

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ELEKTRİK DAĞITIM SİSTEMİNDE ÇOK ETMENLİ
SİSTEME DAYALI GERİLİM REGÜLASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Emre KÖKSAL

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

HAZİRAN 2018

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ELEKTRİK DAĞITIM SİSTEMİNDE ÇOK ETMENLİ
SİSTEME DAYALI GERİLİM REGÜLASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Emre KÖKSAL
(504141043)**

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Ömer GÜL

HAZİRAN 2018

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 504141043 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Emre KÖKSAL, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “ELEKTRİK DAĞITIM SİSTEMİNDE ÇOK ETMENLİ SİSTEME DAYALI GERİLİM REGÜLASYONU” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Ömer GÜL**

İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Belgin TÜRKAY**

İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Yusuf ÖZOĞLU

İstanbul Üniversitesi

Teslim Tarihi : 16 Nisan 2018

Savunma Tarihi : 4 Haziran 2018



ÖNSÖZ

Bu yüksek lisans tezinin konusu belirlenirken güncel ve uygulanabilirliği olan bir konu olmasına özen gösterilmiştir. Dünya genelinde olduğu gibi ülkemizde de dağıtım seviyesinden bağlanan üretim tesislerinin şebeke içerisindeki oranı her geçen gün artmaktadır. Dağıtım sisteminin yapısında meydana gelen değişimlerin sonucu olarak gerilim seviyeleri, yönetmeliklerde belirtilen aralıkların dışına çıkabilmektedir. Dağıtım sisteminde gerilim seviyelerini kontrol edebilmek adına geliştirilen yöntemlerden çok etmenli sisteme dayalı gerilim regülasyonu detaylıca incelenmiştir. Bu amaçla geliştirilen kontrol algoritması ve test sistemi yazılım üzerinde modellenmiş ve benzetim çalışması yapılmıştır.

Çalışmalarımın her aşamasında bana, bilgi ve tecrübeleriyle yol gösteren, tez çalışmamı en iyi şekilde tamamlamam için beni cesaretlendiren danışman hocam Doç. Dr. Ömer GÜL'e, İTÜ Elektrik Mühendisliği Bölümü hocalarıma, yüksek lisans dönemim boyunca bana destek olan arkadaşlarıma, beni yetiştiren ve hayatımın her anında yanımda olan çok sevdiğim aileme teşekkürü bir borç bilirim.

İTÜ BAP biriminin 39015 nolu ve “Elektrik Dağıtım Şebekesine Bağlı Yenilenebilir Enerji Kaynakları ve Enerji Depolama Sistemlerinin Birlikte Çalışma Şartlarının Araştırılması” isimli projeye mali desteği için teşekkür ederiz.

Nisan 2018

Emre Köksal
(Elektrik Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	v
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
ÖZET	xv
SUMMARY	xvii
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	1
1.2 Literatür Araştırması	2
2. DAĞITIK ÜRETİM KAYNAKLARI VE ŞEBEKEYE ETKİLERİ.....	5
2.1 Dağıtık Üretim Kaynakları	5
2.2 Dağıtık Üretimin Elektrik Dağıtım Şebekesine Etkileri	7
2.3 Dağıtık Üretimin Gerilim Regülasyonuna Etkisi	11
2.4 Dağıtık Üretim Kaynaklarının Şebeke Kayıplarına Etkisi	14
2.5 Dağıtık Üretimin Kısa Devre Akımına Katkısı	15
2.6 Dağıtık Üretimin Şebekeye Bağlantı Kriterleri.....	18
3. GERİLİM KONTROL EKİPMANLARI.....	21
3.1 Yük Altında Kademe Değiştirici (YAKD).....	22
3.2 Şönt Kondansatör	23
3.3 Şönt Reaktör	24
3.4 Kademeli Gerilim Regülatörü	25
3.5 Statik VAr Kompansatörler.....	26
3.5.1 Sabit kondansatörlü ve tristör kontrollü reaktörler	27
3.5.2 Tristör kontrollü kondansatörler	27
3.5.3 Tristör kontrollü reaktörler ve tristör kontrollü kondansatörler.....	27
3.6 Senkron Kompansatör	28
3.7 Statik Senkron Kompansatörler	28
3.8 Dağıtık Üretim.....	30
3.8.1 Reaktif güç kontrolü.....	31
3.8.2 Aktif güç üretimini kısıtlamak	33
4. ÇOK ETMENLİ SİSTEM İLE GERİLİM KONTROLÜ	35
4.1 Etmenin Tanımı ve Özellikleri	35
4.2 Çok Etmenli Sistem.....	38
4.3 Çok Etmenli Sistemlerin Uygulama Alanları.....	39
4.4 Çok Etmenli Sistem Yapıları.....	40
4.4.1 Hiyerarşik çok etmenli sistem	40
4.4.2 Düz çok etmenli sistem	41
4.4.3 Modüler çok etmenli sistem	42
5. UYGULAMA.....	45

5.1 Tercih Edilen ÇES Algoritması.....	45
5.2 Şebeke Modeli	49
5.3 Durum 1 – Tüm Santrallerin Devre Dışı Olduğu ve 4.Barada Yük Artışı Olduğu Durumda Şebeke Gerilim Düşümünün Düzeltilmesi	51
5.4 Durum 2 – 1 Adet Santralin Devre Dışı Olduğu Durumda Şebeke Gerilim Düşümünün Düzeltilmesi	52
5.5 Durum 3 – Tüm Santrallerin Üretimlerinin Arttığı Durumda Şebeke Gerilim Artışının Düzeltilmesi	53
6. SONUÇLAR	55
KAYNAKLAR.....	57
ÖZGEÇMİŞ.....	63



KISALTMALAR

ACL	: Etmen Haberleşme Dili (Agent Communication Language)
AVC	: Otomatik Gerilim Kontrolü (Automatic Voltage Control)
ÇBAG	: Çift Beslemeli Asenkron Generatör
ÇES	: Çok Etmenli Sistem
DFIG	: Çift Beslemeli Asenkron Generatör (Doubly Fed Induction Generator)
FC	: Sabit Kondansatör (Fixed Capacitor)
FIPA Agents)	: Akıllı Fiziksel Etmen Kuruluşu (Foundation For Intelligent Physical Agents)
GW	: Gigawatt
JADE Framework)	: Java Etmen Geliştirme Platformu (Java Agent DEvelopment Framework)
kVAR	: Kilo Volt Amper Reaktif
MAS	: Çok Etmenli Sistem (Multi Agent System)
MVAR	: Mega Volt Amper Reaktif
MW	: Megawatt
MYTM	: Milli Yük Tevzi Merkezi
OGR	: Otomatik Gerilim Regülatörü
OLTC	: Yük Altında Kademe Değişirici (On Load Tap Changer)
RES	: Rüzgar Enerjisi Santrali
STATKOM	: Statik Kompansatör
SVC	: Statik Var Kompansatörü (Static Var Compensator)
SVR	: Kademeli Gerilim Regülatörü (Step Voltage Regulator)
TCR	: Tristör Kontrollü Reaktör (Thyristor-Controlled Reactor)
THD	: Toplam Harmonik Distorsiyonu
TSC	: Tristör Kontrollü Kondansatör (Thyristor-Switched Capacitor)
VAR	: Volt Amper Reaktif
YAKD	: Yük Altında Kademe Değişirici
YHPYS	: Yan Hizmet Piyasa Yönetim Sistemi



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 5.1 : Rüzgar türbinlerinin devrede olmadığı durumda bara gerilimleri.....	51
Çizelge 5.2 : ÇES ile gerilim regülasyonu yapıldığı durumda bara gerilimleri.	51
Çizelge 5.3 : Yük-4'ün iki katı yük talep ettiği durumda bara gerilimleri	52
Çizelge 5.4 : YAKD'nin devreye girdiği durumda bara gerilimleri.	52
Çizelge 5.5 : RES-3'ün devreden çıktığı durumda bara gerilimleri.....	53
Çizelge 5.6 : RES-3'ün devreden çıktığı ve yük artışı durumunda bara gerilimleri..	53
Çizelge 5.7 : ÇES ile gerilim regülasyonu yapıldığı durumda bara gerilimleri.	53
Çizelge 5.8 : Rüzgar hızının arttığı durumda bara gerilimleri.....	54
Çizelge 5.9 : Rüzgar hızının arttığı durumda bara gerilimleri.....	54
Çizelge 5.10 : ÇES ile gerilim regülasyonu yapıldığı durumda bara gerilimleri.	54



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Elektrik şebeke yapısının geçmişten günümüze gelişimi.....	5
Şekil 2.2 : Türkiye kurulu gücünün yıllar itibariyle gelişimi [32].....	6
Şekil 2.3 : 2016 yılı verilerine göre Türkiye kurulu gücünün enerji kaynaklarına göre dağılımı [33].	7
Şekil 2.4 : Radyal dağıtım sistemi tek hat şeması ve fazör diyagramı [41].	12
Şekil 2.5 : Dağıtık üretiminin mevcut olduğu bir dağıtım sisteminin tek hat şeması [41].....	13
Şekil 2.6 : 1.8 MW Rüzgar türbini reaktif güç kapasite eğrisi.	15
Şekil 2.7 : Dağıtık üretimlerin kısa devre akımına katkısı [42].....	17
Şekil 3.1 : Tip B Tek Fazlı Kademeli Voltaj Regülatörü [53].	25
Şekil 3.2 : TCR/FC kombinasyonuna sahip SVC'nin şematik gösterimi [50].....	27
Şekil 3.3 : TSC/TCR kombinasyonuna sahip SVC'nin şematik gösterimi [55].	28
Şekil 3.4 : Reaktif güç üretimi yapan senkron kompensatör (a) ve gerilim kaynaklı (b) STATKOM devre şemaları [57].	29
Şekil 3.5 : Akım kaynaklı (a) ve gerilim kaynaklı (b) STATCOM devre şemaları. .	29
Şekil 3.6 : İnverter reaktif güç kapasite eğrisi.	32
Şekil 4.1 : Etmen ve ortam arasındaki etkileşimin temel gösterimi.	35
Şekil 4.2 : Alt ve üst kademelerin yer aldığı hiyerarşik yapıya sahip çok etmenli sistem şeması etmen ve ortam arasındaki etkileşimin temel gösterimi [29].....	41
Şekil 4.3 : Her bir etmenin birbiriyle iletişim kurabildiği düz (demokratik) yapıya sahip çok etmenli sistem şeması [29].	42
Şekil 4.4 : Modüler ÇES yapısı [29].....	43
Şekil 5.1 : ÇES tabanlı gerilim kontrol algoritması akış diyagramı [29].	48
Şekil 5.2 : Test sistemi tek hat diyagramı.....	50
Şekil 5.3 : Simulink ortamında modellenmiş olan test sistemi.....	50



ELEKTRİK DAĞITIM SİSTEMİNDE ÇOK ETMENLİ SİSTEME DAYALI GERİLİM REGÜLASYONU

ÖZET

Teknolojik gelişmeler ve insan nüfusundaki artış enerji ihtiyacını her geçen gün artırmaktadır. Sürekli olarak artış gösteren enerji ihtiyacı nedeniyle enerji üretim tesisleri üzerine yapılan çalışmalar da yoğunlaşmıştır. Enerji ihtiyacını farklı kaynaklardan karşılamaya yönelik yapılan çalışmaların neticesinde elektrik şebekelerinin yapısı da değişme uğramaktadır. Önceleri sadece iletim sisteminden bağlı büyük kurulu güçlere sahip merkezi üretim tesislerinden faydalanılır iken son yıllarda küçük ölçekli dağıtık üretimlerin de enerji ihtiyacını karşılamaya yönelik hatırı sayılır derecede katkıları söz konusu olmaktadır. Yenilenebilir enerji veya fosil yakıt bazlı dağıtık üretimler dağıtım şebekesinin hemen her yerinden şebekeye dahil olabilmektedirler.

Ülkemizde de dünya genelinde olduğu gibi dağıtık üretimler yaygınlaşmaktadır. Kurulum safhasında çok yönlü enerji akışlarına ve dağıtım seviyesinden yapılan üretim entegrasyonlarına uygun olarak tasarlanmamış elektrik şebekeleri, dağıtık üretim entegrasyonları sonucunda bazı sorunlar ile karşılaşabilmektedir. Dağıtık üretim entegrasyonu kısa devre akımlarında artış, adalaşma riski, kararlı hal gerilimlerinde düzensizlikler gibi üzerine düşünülmesi gereken konuları ortaya çıkarmıştır. Dağıtık üretimlerin şebekeye entegrasyonları uluslararası standartlar ve yerel yönetmeliklerde belirtilen kriterler dahilinde detaylıca incelenmesi gereken bir alan haline almıştır.

Bu tezin özelinde dağıtım sisteminde meydana gelen gerilim düzensizliklerini önlemeye yönelik kullanılan geleneksel ve modern ekipmanlar tanıtılmıştır. Dağıtık üretimler ve yük değişimlerinden kaynaklanan gerilim düzensizliklerini ortadan kaldırmak adına çok etmenli sistem ile gerilim regülasyonu yöntemi üzerinde detaylıca durulmuştur.

Dağıtım sisteminde gerilim seviyesini izin verilen limitler içerisinde tutmak için gerilim kontrol ekipmanlardan faydalanılmaktadır. Buna ilave olarak modern dağıtık üretimler yapıları gereği şebekeye bağlandıkları noktadan kontrollü bir şekilde sisteme reaktif güç enjekte etme veya absorbe etme kabiliyetlerine sahiptirler. Bu yöntemle gerilim seviyesine etki edebilen dağıtık üretimlerin sisteme dahil olması, dağıtım sistemlerinde gerilim regülasyonunu birçok etmenin koordineli bir şekilde çalışması ile gerçekleştirilebilecek bir olgu haline getirmiştir.

Yapılan literatür araştırmaları sonucunda çok etmenli sistem mimarisine dayanan bir algoritma ile gerilim regülasyonu yapmayı amaçlayan kontrol mekanizması Matlab yazılımının Simülink arayüzü üzerinde modellenmiştir. Test sistemi yine Simülink üzerinde radyal bir orta gerilim şebekesi şeklinde modellenmiştir. Modellenen sistemde 4 adet rüzgar santrali, yükler, transformatörler havai hatlar ve yer altı kabloları yer almaktadır. Kararlı hal gerilimini bozmak adına sistemde değişimler meydana getirerek çok etmenli sistem ile gerilim regülasyonunun sonuçları

gözenmiştir. Dağıtık üretimlerin üretim miktarının farklı rüzgar hızları ile değişmesi, santrallerin arıza sebebiyle veya aşırı rüzgar hızı sebebiyle devre dışı kalması, talep yük miktarının değişmesi gibi olası durumların etkileriyle 3 farklı durum için simülasyon çalışması yapılmıştır.

Yapılan simülasyon çalışması da göstermiştir ki, şebekede yer alan rüzgar santrali üretim değerlerinde ve talep yük miktarlarında yapılan değişiklikler bara gerilimlerini yükseltebilmekte ve düşürebilmektedir. Gerilimin limit değerlerin dışına çıktığı durumlarda çok etmenli sistem düzensizliği yük etmenleri ile algılayabilmiş, ilgili etmenlerle iletişim kurarak gerilimi yeniden izin verilen değer aralığına başarılı bir şekilde çekebilmiştir. Bu sayede sistem gerilimleri yönetmeliklerde belirtilen aralıkta tutulmuş, sistemde yer alan ekipmanların gerilim düzensizliği sebebiyle zarar görmesi ve devre dışı kalması engellenmiştir. Gerilimi düzenlerken test sisteminde yer alan şönt kondansatör, yük altında kademe değiştirici ve rüzgar santrallerinin reaktif güç kapasitelerinden faydalanılmıştır. Gerilim kontrol ekipmanları koordineli bir şekilde çalıştırılarak manevra sayısı en aza indirilmiştir.



MULTI AGENT SYSTEM BASED VOLTAGE REGULATION FOR ELECTRICAL DISTRIBUTION SYSTEM

SUMMARY

Technological developments and the increase in the human population are increasing the need for energy day by day. Due to the ever-increasing need for energy, work on energy power plants has also become more frequent. As a result of the efforts to meet energy needs from different sources, the structure of the electricity networks is undergoing change. While the energy need only available from centralized generation facilities with large-scale installed capacities connected to the transmission system, in recent years small scale distributed generations have contributed considerably to meet the energy need. Renewable energy or fossil fuel-based distributed productions can be connected almost anywhere in the distribution network.

Distributed productions become more popular in Turkey as it is in the world. Electrical networks that are not designed for generation integrations made from distribution levels and bidirectional energy flows at the installation stage may cause some problems with distributed generation integrations. Distributed generation integration reveals the issues that need to be addressed, such as the increase in short-circuit currents in the network, the risk of islanding, and irregularities in steady-state voltages. The integration of distributed production into the network has become an area that needs to be examined in detail within the criteria specified in international standards and local regulations.

This thesis has been specifically introduced to the traditional and modern equipment used to prevent voltage violations in the distribution system such as on load tap changer (OLTC), shunt capacitor, shunt reactor, step voltage regulator, static VAR compensators, synchronous compensator, static synchronous compensator. In order to remove the voltage violations originating from distributed generation, multi-agent system (MAS) based voltage regulation method studied in detail.

MAS based technology found a place at power engineering in recent years. MAS is used in power engineering four different area such as distributed control, modelling and simulation, monitoring and diagnostics, protection. Researches show that MAS technology can be an effective way to make dynamic operations in future distribution network.

Voltage control equipment is used to keep the voltage level within the permissible limits in the distribution system. In addition, modern distributed generations have the ability to inject or absorb reactive power into the system in a controlled way from the point where they are connected to the network due to the nature. Most of the distributed generation connected to the grid through power electronic converters. Distributed generation can provide reactive power to the grid by means of converter structure. For wind turbines with this structure can provide maximum reactive power even under the lowest wind speed condition or maximum generation. The connection

of distributed generation can affect the voltage level. For this reason, making the voltage regulation in the distribution systems a phenomenon that can be realized by the coordinated operation of many factors.

As a result of the literature studies, the autonomous control technique that aiming voltage regulation with an algorithm based on multi-agent system architecture is modelled on the Simulink interface of Matlab software. In addition, the test system modelled as a radial medium voltage network on Simulink. In the modelled system, there are four wind power plants, loads, step-up/down transformers, OLTC, shunt capacitor, overhead lines and underground cables. Wind turbine which was modeled in wind power plant was chosen doubly fed induction generator based (DFIG) one. DFIG type of wind turbine has wound rotor induction generator and AC/DC/AC converter installed between rotor windings and grid. Active and reactive power generation of DFIG wind turbines can be controlled.

In order to disturb the steady-state voltage some changes made in the system the effects of the voltage regulation with the multi-agent system were observed. Simulation studies have been carried out for three different cases with the effect of changing the generation amount of the distributed generation with different wind speeds, the failure of the power plants due to faults or trip due to excessive wind speed.

In the first case, due to the change of the wind speed from 8 m/s to 25 m/s, causes trip at all wind farms to protect mechanical equipment. Under this circumstances undervoltage issue observed. Load agent of related bus detects this violation and regulates voltage by switching on shunt capacitor. In the same case also the demand load rise effects simulated. In this situation voltage regulation made by OLTC operation.

Second case simulated to observe voltage regulation by distributed generation reactive power support capabilities. In this case one of the wind farm trips and load demands of the system increase. Load agent of MAS detects undervoltage problem and sends message the related reactive power control agent to regulate voltage. System voltages are brought to permissible range by wind turbines reactive power support.

At the last case, voltage rise reaction of the MAS simulated. The wind speed changes from 8 m/s to 12 m/s. As expected, this is also increases active power generation of wind farms. At the same time demand load of the system decreases. As seen in the case 2 distributed generation can regulate voltage with reactive power support capability. In case 3, after the violation detection load agent sends message to the related agent to reduce voltage, unlike the case 2. Voltage regulate by absorbing reactive power from the network at the connection point of wind farm.

Simulation studies show that changes in the wind power plant generation values and demand load quantities in the network can increase or decrease bus voltages. In cases where the voltage exceeded the limit values, the multi-agent system could perceive the violation due to the load agents and successfully regulate the voltage to the permissible value range by communicating with the related agents. In this respect, the system voltages kept within the limits specified in the regulations, and the equipment in the system was prevent from being damaged or disabled due to voltage violations. Shunt capacitors, on load tap changers and reactive power capabilities of wind power plants, which are included in the test system during the regulation of the

voltage, have been utilized. Voltage control equipment is operated in a coordinated manner and minimizing these equipment switching operations.





1. GİRİŞ

1.1 Tezin Amacı

Enerji ihtiyacının her geçen gün artması gelişen sanayinin ve artan dünya nüfusunun kaçınılmaz sonuçlarından birisidir. Bu ihtiyacı karşılamaya yönelik yapılan araştırmalar ve teknolojik gelişmelerin sonucu olarak elektrik üretim tesisleri daha modern yapılara kavuşmaktadır. Tüklenen, fosil yakıt bazlı santrallerin çevreyi ve insan sağlığını tehdit ettiği gerçeği, insanlığı rüzgar ve güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarına yöneltmiştir. Yenilebilir enerji kaynaklarından enerji üretebilen modern dağıtık üretimler, elektrik dağıtım şebekesinin birçok noktasından sisteme dahil olabilmektedir.

Dağıtım şebekesine entegre olan dağıtık üretim tesislerinin sayısının günden güne artması, dağıtım şebekesini yapısal anlamda etkilemektedir. Dağıtım seviyesinden gerçekleştirilen üretim entegrasyonları şebekedeki kısa devre akımları, adalaşma riski, koruma koordinasyon yapısı, gerilim profili gibi konularda, tasarım ve işletme alanlarında üzerine detaylıca eğilmeyi gerektirmektedir.

Bu tezin özelinde, dağıtım şebekesinin yapısındaki değişimlerin bir sonucu olan gerilim seviyesinde meydana gelen düzensizlikler üzerinde durulmuştur. Kurulum esnasında pasif yapıya sahip geleneksel dağıtım şebekeleri üretime uygun olarak tasarlanmamıştır. Önceleri tek yönlü enerji akışının olduğu dağıtım şebekelerindeki tek sorun gerilim düşümüydü. Dağıtık üretimlerin şebekeye farklı noktalardan dahil olması sistemi aktif bir yapıya büründürmüştür.

Dağıtık üretimlerin bağlandığı noktalarda gerilim, sınır değerlerin üzerine çıkabilmektedir. Bu sorunu çözmek adına statik reaktif güç kompensatörleri (SVC), statik senkron kompensatörler (STATKOM), yük altında kademe değiştirici (YAKD), şönt reaktör ve kondansatör gibi gerilim kontrol ekipmanlarından faydalanılmaktadır. Bu ekipmanların koordineli bir şekilde kontrol edilmesi ve sistemdeki değişimlere hızlı bir şekilde tepki vermek adına çok etmenli sistem (ÇES)

tabanlı dağıtık gerilim kontrol yöntemi geliştirilmiştir. Çok etmenli sistem yapısından faydalanılarak aktif dağıtım sistemleri dağıtık bir şekilde izlenebilir ve kontrol edilebilir.

Bu tez çalışmasında modern dağıtım şebekelerinde gerilim regülasyonu için son zamanların güncel bir araştırma konusu olan ÇES tabanlı gerilim kontrol çalışmaları incelenmiştir. İncelenen çalışmalar ışığında, modellenen test sistemine uygun şekilde düzenlenmiş olan bir ÇES algoritması tanıtılmıştır. Test sistemi MATLAB & Simulink ortamında modellenmiştir. Modellenmiş olan sistemde dağıtık üretimlerde meydana gelebilecek gerçekçi senaryolar test edilmiş, gerilimin izin verilen limitlerin dışına çıktığı durumlarda, sistemin gerilimi düzenlemek adına gösterdiği tepkiler gözlenmiştir.

1.2 Literatür Araştırması

Dağıtık üretim, merkezi elektrik üretim santrallerinden daha küçük ölçekli ve güç sisteminin neredeyse her noktasından bağlantı yapabilen elektrik üretim tesisleri olarak tanımlanmıştır [1]. Elektrik şebekeleri dağıtım seviyesinde aktif bir üretime uygun olarak tasarlanmamıştır. Bu sebeple dağıtık üretimlerin mevcut şebekelere entegrasyonlarında dağıtık üretimlerin olumlu etkilerinden verimli bir şekilde faydalanmak ve olası olumsuz etkilerinden kaçınmak için çaba sarf etmek gerekmektedir. Dağıtık üretimlerin şebeke kayıplarını azaltmak, gerilim profilini düzenlemek, güç kalitesini yükseltmek gibi olumlu etkileri mevcuttur. Buna karşın entegrasyon öncesinde ve işletme anında; sistem topraklaması, transformatör bağlantısı, kısa devre etkileri, çift yönlü enerji akışları ve buna bağlı koruma koordinasyonları, gerilim dalgalanmaları, adalaşma riski ve harmonikler gibi konular üzerine detaylıca eğilmeyi gerektirmektedir [2].

Bu tez özelinde dağıtık üretimlerin sebep olduğu gerilim düzensizlikleri incelenmiştir. Ancak dağıtım şebekesinde dağıtık üretimler yaygınlaşmadan önce de dizayn ve işletme anında gerilimi düzenleme ihtiyacı mevcuttu. Geleneksel yöntemler gerilimin, yük akımlarından dolayı hat sonlarına doğru muhtemel düşüşünü engellenmek istiyordu. Dağıtık üretimlerin yaygınlaşması yük tahminlerine bağlı gerilim kontrolünün dışında dağıtık üretimlerin, üretim değerlerinin de hesaba katılmasını gerektirmiştir. Bu sebeple literatürde dağıtık üretimler, yük altında

kademe değiştiriciler, statik reaktif gc kompensatörleri gibi etmenler kontrol edilerek gerilim regülasyonu amaçlanan çalışmalar yapılmıştır [3-10]. [11] referans numaralı çalışmada dağıtık üretimler ve YAKD kontrol edilerek gerilimin istenilen limitler içerisinde tutulduğu bir çalışma yapılmıştır. [12] dağıtık üretimlerin yer aldığı dağıtım şebekesi gerilimi sadece YAKD'den faydalanılarak düzenlenmiş, [13] bunu SVC kullanarak yapmıştır. [14] aktif gerilim kontrolü için algoritma geliştirerek birçok dağıtık üretime uygulanabilen bir kontrol önermiştir. [7] rüzgar türbinlerini gc faktörü kontrol ve gerilim kontrol modlarında çalıştırarak gerilimi kontrol etmektedir, en son çare olarak da aktif gc üretimini kısıtlama yoluna gider. [8] aktif gc kısıtlamasını gc akışı analizinden elde ettiği duyarlılık matrisinden faydalanarak gerçekleştirmiştir. [9] sistemde yer alan kondansatörler ve YAKD'leri daha önceden evrimdişi simülasyonlarla belirlenen ayar değerleri ile kontrol ederek gerilim regülasyonu sağlar. [10] kademeli gerilim regülatörü (SVR), şönt reaktör-kondansatör, SVC gibi ekipmanları yapay sinir ağlarıyla kontrol ederek gerilim regülasyonu yapmıştır.

Dağıtım sistemi gün geçtikçe daha karmaşık bir yapı almaktadır. Son dönemlerde gerilim regülasyonu için dağıtık üretimleri ve gerilim kontrol ekipmanlarını hızlı ve koordineli alıştırma üzerine araştırmalar sıklamıştır. Dağıtım şebekelerinde gerilim kontrolünü çok etmenli sistemlerden yararlanarak sağlamak bu araştırmalarda tercih edilen bir yöntem olmaya başlamıştır. ES birbiri ile iletişim kuran, farklı yeteneklere sahip iki veya daha fazla etmenin bir araya gelerek oluşturduğu bir yapıdır [15].

Dağıtım şebekelerinde dağıtık kontrol sağlamak amacıyla çok etmenli sistemden faydalanan ve bu sayede lokal gerilim kontrol cihazlarını birbirleri ile koordineli şekilde çalıştırarak gerilimi izin verilen limitler dahilinde tutmayı sağlayan çalışmalar yapılmıştır [16-18]. Dağıtık üretimlerin reaktif gc üretim kapasitelerinden faydalanarak ES yöntemiyle gerilim düzenleme [16] referans numaralı çalışmada gerçekleştirilmiştir. [17] kademe değiştiricileri ve dağıtık üretimleri kontrol etmeni olarak tanımlamış, gerilimi düzenlemek ve kademe değişimini minimum sayıda tutmak adına algoritma geliştirmiştir. [18] dağıtık üretimlerin yer aldığı şebekede her bir dağıtık üretime ve hat kondansatörlerine uzak u birimi (RTU) yerleştirerek etmenler arası koordinasyonu sağlamayı ve gerilimi kontrol etmeyi önermiştir. [19] kontrol röle ve hat röle etmenleri tanımlayarak

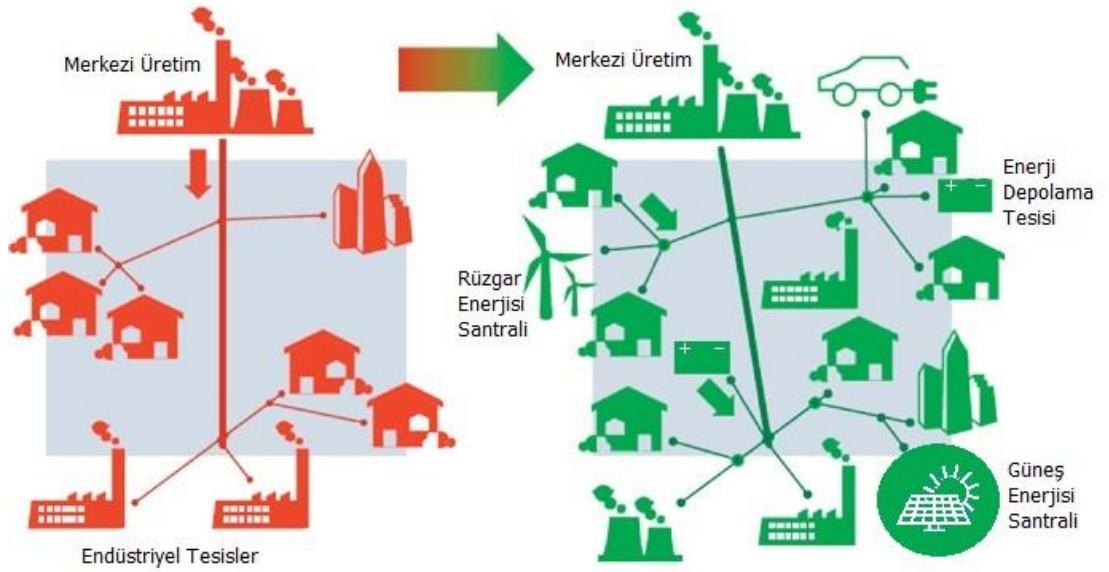
gerilimi kontrol etmiştir. [20] dağıtım trafolarını gerilim kontrol etmeni olarak tanımlamış son çare olarak da aktif güç üretimini sınırlandıran bir yapı kurgulamıştır. [21] fotovoltaik dağıtık üretimlerin sebep olduğu gerilim değişimlerini düzenlemek adına bir adet yönetici etmen ve birden çok lokal etmen tanımlamıştır. [22,23] yük etmenlerini sistemdeki değişimleri gözlemle etmeni olarak kullanmış, YAKD ve DG'leri ise kontrol elemanı olarak tanımlamıştır. [24] bir etmen gerilimin limitler dışına çıktığını fark ettiğinde kompanzasyon etmeni olarak tanımladığı etmenle iletişime geçmesini onun aracılığıyla diğer dağıtık üretimlerden gerilim desteği talep etmesini sağlamıştır. [25] sistemde var olan STATKOM cihazlarını akıllı etmenler olarak tanımlamış FIPA (Foundation for Intelligent Physical Agents) agent etkileşim platformunu hazır bir şekilde sunan JADE (Java Agent Development) yazılımından faydalanarak ÇES yöntemi ile gerilimi düzenlemiştir. [26-28] benzer gerilim sorunlarını çözmek adına sistemi alt bölgelere ayırmayı tercih etmişler (modüler yapı) bu şekilde dağıtık kontrolü daha efektif bir yapıya büründürmeyi hedeflemiştir. [29] gerilim regülasyonunun yanına kayıpları da minimize etmek adına ÇES yapısından faydalanmış, etmen haberleşmesinde bazı varsayımlar yaparak sistemi basite indirgemiş, MATLAB ve Simulink ortamında gerçekleştirildiğini göstermiştir.

Bu tezin 2.bölümünde dağıtık üretim kaynakları ve şebekeye etkilerinden bahsedilmektedir. 3.bölümünde genelensel ve modern yöntemlerde kullanılan gerilim kontrol ekipmanları tanıtılmıştır. 4.bölümde etmenler ve ÇES yapılarından bahsedilmiş ve bu yöntemin elektrik mühendisliğindeki kullanım alanları anlatılmıştır. 5.bölümde ÇES tabanlı bir gerilim kontrol algoritması tanıtılmış ve simüle edilmiştir. 6.bölümde ise önerilen sistemin ve simulasyonun sonuçlarına değinilmiştir.

2. DAĞITIK ÜRETİM KAYNAKLARI VE ŞEBEKEYE ETKİLERİ

2.1 Dağıtık Üretim Kaynakları

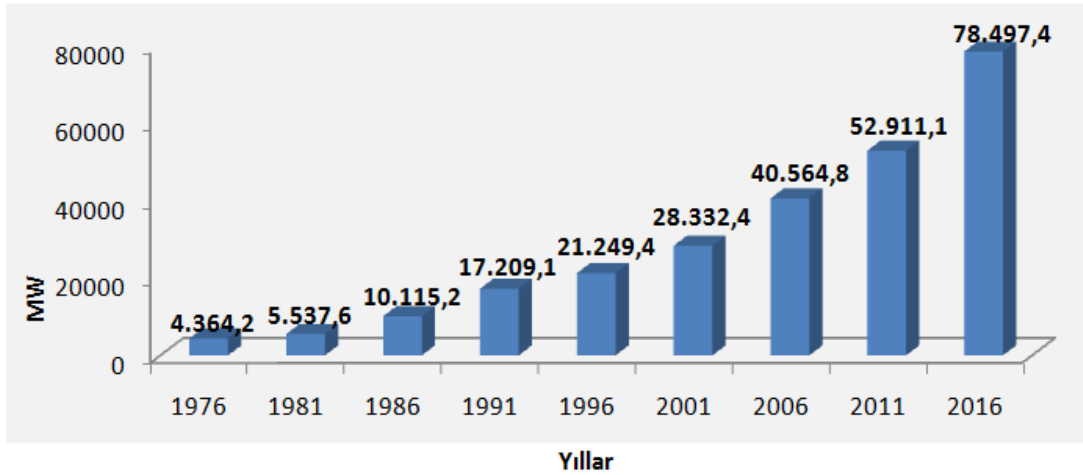
Elektrik enerjisi endüstrisinin ilk dönemlerine tekabül eden 20.yy'ın başlarında ısıtma, soğutma, aydınlatma, tahrik gücü gibi tüm enerji ihtiyaçları en yakın kaynaktan veya ihtiyacın olduğu noktadan sağlanırdı [30]. Gelişen teknolojinin avantajları ve enerji endüstrisindeki ekonomik gelişmeler şebeke yapısını, GW mertebesinde kurulu güçlere sahip, yerleşim yerlerinden uzakta bulunan termal santrallerden bugün bildiğimiz yapıya yaklaştırmıştır. Bazı tüketicilerin teknik ve ekonomik olarak belirli yeterliliğe ulaşması kendi enerjilerini üretme çabalarını da beraberinde getirmiştir. Genleneksel dağıtık üretim olarak tabir edilen bu yöntem ilk dönemlerinde genelde enerji kesintilerinde, enerji ihtiyacını karşılamak düşüncesine dayanmaktaydı [31]. İlerleyen yıllarda malzeme teknolojilerindeki gelişmeler geleneksel dağıtık üretim yönteminin kullanım alanını genişletmeye başladı ve dağıtık üretimi sadece yedek besleme kaynağı olarak kısıtlamayıp, modern forma geçiş yapmasını sağladı (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 : Elektrik şebeke yapısının geçmişten günümüze gelişimi.

Günümüz dünyasında halen ülkeler enerji ihtiyaçlarının büyük bir bölümünü, fosil yakıt bazlı santraller, hidroelektrik santralleri, nükleer enerji santralleri gibi büyük kurulu güçlere sahip merkezi santraller ile karşılamaktadır. Bu ve benzeri santraller gerek hammadde ihtiyaçları gerekse de ihtiyaç duydukları coğrafi koşullar sebebiyle yerleşim bölgelerinden uzakta kurulmak durumundadırlar. Tüketici ile enerji üretim noktası arasındaki uzun mesafeler iletim hatlarındaki enerji kayıplarını ve enerji hatlarının kurulum maliyetlerini artırmaktadır. Ayrıca uzun mesafeler güvenlik sorunlarını da beraberinde getirmekte ve arıza noktalarının sayısının artmasına sebebiyet vermektedir.

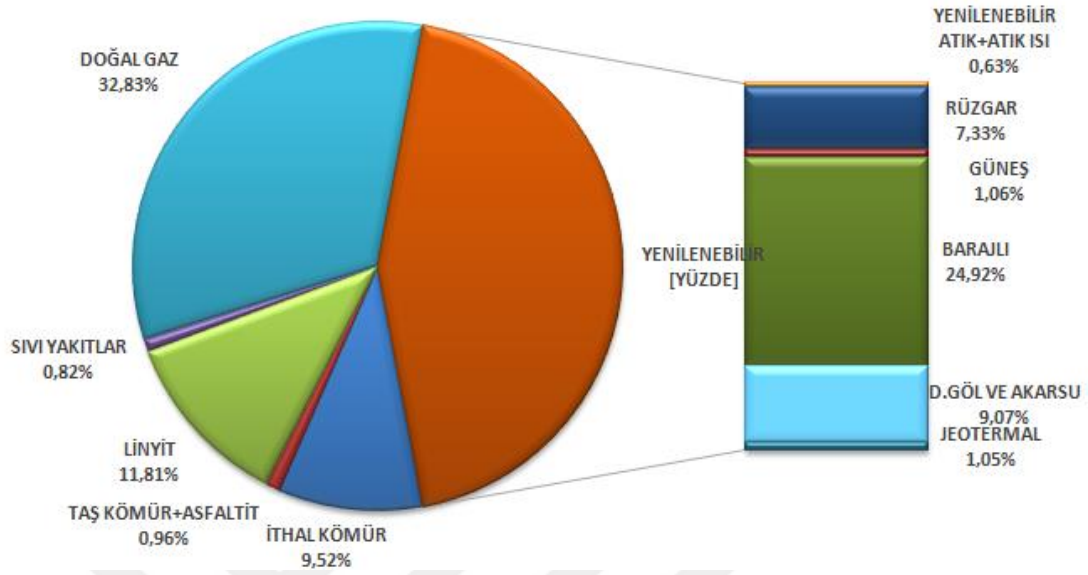
Tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de enerji ihtiyacı günden güne artmaktadır. Ülkemizde var olan güneş enerjisi ve rüzgar enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynağı potansiyellerinden her geçen yıl daha yüksek oranda faydalanılmaktadır. TEİAŞ'ın yayınladığı resmi verilere göre Şekil 2.2 ve Şekil 2.3'te sırasıyla ülkemizdeki kurulu elektrik gücünün 2016 yılına kadarki artışı ve 2016 yılı itibarıyla kurulu gücün birincil enerji kaynaklarına dağılımı görülmektedir [32].



Şekil 2.2 : Türkiye kurulu gücünün yıllar itibarıyla gelişimi [32].

IEEE dağıtık üretimi, merkezi elektrik üretim santrallerinden daha küçük ölçekli ve güç sisteminin neredeyse her noktasından bağlantı yapabilen elektrik üretim tesisleri olarak tanımlanmıştır [2]. Genel hatlarıyla dağıtık üretimi, yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanan santraller ve fosil yakıt kullanan santraller olarak ikiye ayırabiliriz. Bu tanım kapsamında fosil yakıt bazlı teknolojileri kullanan tesisler gaz türbinleri, yakıt hücreleri, kojenerasyon sistemleri; yenilenebilir enerji

teknolojilerinin kullanıldığı tesisler ise rüzgar, fotovoltaik , hidroelektrik, biyokütle santralleri olarak sıralanabilir [34].



Şekil 2.3 : 2016 yılı verilerine göre Türkiye kurulu gücünün enerji kaynaklarına göre dağılımı [33].

2.2 Dağıtık Üretim Elektrik Dağıtım Şebekesine Etkileri

Dağıtık üretim üzerine yapılan çalışmalar, dağıtık üretimin teknik, ekonomik, çevresel, güvenlik gibi birçok açıdan faydalarının olduğunu gözler önüne sermektedir. Büyük güçlü santrallerin yerine tüketiciye daha yakın bölgelere kurulabilen küçük güçlü ve çoğunluğu yenilenebilir enerji kaynakları kullanan dağıtık üretim tesislerinin faydalarını şu şekilde sıralayabiliriz [31]:

- Dağıtık üretim elektrik sisteminde güvenilirliği artırır. Şebekede yer alan yüklerin beslenmesi için şebekeye kabiliyet kazandırır. Aşırı yüklenmeden kaynaklı enerji kesintilerinin oranını düşürür.
- Dağıtık üretimlerin yaygınlaşması ve kullanılması puant yük ihtiyacını azaltır (peak shaving).
- Dağıtık üretim elektrik şebekesinde yan hizmet olarak kullanılabilir. Lokal olarak ihtiyaç duyulan reaktif güç desteği, gerilimi nominal seviyesine yaklaştırma gibi - tezin uygulama bölümlerinde daha detaylı bahsedilecek - konularda dağıtık üretimlerin yeteneklerinden faydalanılır.
- Dağıtık üretim enerji kalitesini artırır. Modern dağıtık üretim tesisleri genellikle enerji depolama ekipmanları, güç elektroniği elemanları ve güç

düzenleme ekipmanlarıyla entegredirler. Bu gibi cihazlar güç kalitesi problemlerinin çözülmesinde çok kullanışlıdır. Örneğin hassas cihazları ani gerilim yükselmeleri gerilim çökmeleri gibi durumların olası zararlarından korurlar. Ayrıca elektrik şebekesindeki toplam harmonik distorsiyonu (THD) azaltıcı yönde etkileri vardır.

- Dağıtık üretim yer kazancı sağlar. Enerji üretimi, iletimi ve dağıtımını yeryüzünde ciddi alanlar parsellemektedir. Dağıtık üretim daha az alan kullanımı gerektirmektedir ayrıca bazı dağıtık üretim tipleri binalara entegre edilebilmektedir (motor odasında, çatı tipi vs.).
- Dağıtık üretim CO₂ emisyonunu azaltır. Modern dağıtık üretim tesisleri yenilenebilir enerji kaynakları veya geri dönüşüm teknolojilerini kullanmaktadır. Bu sayede zararlı gazların atmosfere salınımı belirli ölçülerde azaltılır, insan sağlığı ve doğanın korunması anlamda olumlu kazanımlar elde edilir.
- Dağıtık üretim uzak bölgelere elektrik enerjisinin tesis edilmesinde ekonomik bir çözümdür. Dağıtık üretim teknolojileri uzak bölgelere, bölgenin yerel kaynaklarını kullanarak enerji sağlayabildiğinden ötürü, mevcut şebeke bağlantısının genişletilerek bu bölgelere enerji taşınmasından çok daha ekonomik bir çözümdür. Adalar gibi ulaşılması güç alanlarda kurulan mikro şebekeler ile dağıtık üretimden faydalanılır.
- Dağıtık üretim, elektrik şebekesindeki güvenlik açıklarının sayısını düşürür ve şebekeye esneklik kazandırır. İletim hatlarının azalması, bu hatların hatların maruz kalabileceği saldırıların ihtimalini de azaltacaktır. Ayrıca çok sayıda küçük ölçekli ve coğrafi olarak farklı noktalara yayılmış olan enerji üretim tesisleri, büyük ölçekli merkezi santrallere oranla elektrik şebekesinin güvenilirliğini artırır. Bir anlamda şebekenin enerji ihtiyacını merkezi santrallerin tekeline çıkartır. Enerji kesintileri esnasında kritik yüklerin enerji ihtiyacı dağıtık üretim tesisleri tarafından sağlanabilir.

Dağıtık üretimin yukarıda bahsedilen faydalarına karşın yaygınlaşmasının önünde bir takım zorluklar ve sorunlar da vardır. Bu hususların bazıları üzerine tezin ilerleyen bölümlerinde detaylıca eğilinilecektir. Ancak ana hatlarıyla bahsetmek gerekirse bu hususlar aşağıda yer aldığı şekilde sıralanabilir:

- Gerilim regülasyonu ve kayıplar açısından bazı sorunlar yaratabilirler. Normal şartlarda eğer uygun altyapı var ise radyal dağıtım sistemleri, yük altında kademe değiştirci transformatörler, reaktörler ve kondansatörler gibi ekipmanlar vasıtasıyla gerilimi düzenleyebilirler. Dağıtık üretimlerin şebekelerde yer alması şebekenin güç akış yönünü tek yöne doğru olmaktan (merkezi santrallerden tüketicilere doğru) çıkarır. Dağıtık üretimler bazı durumlarda, gerilimi düzenleyici ekipmanların yanlış ayar değerlerinde çalışmasına ve şebekeyle koordine çalışamamasına sebebiyet vermektedir [36,36]. Güç akışının değişmesi reaktif güç kontrol yapısının farklılaşmasına, dağıtım sistemine ait koruma koordinasyonunun değişmesine neden olur. Bu etkilerin boyutu, dağıtık üretimin şebekeye bağlantı noktasının pozisyonu, üretimin büyüklüğü gibi etmenlerle ilişkilidir.
- Dağıtık üretimde kullanılan inverter yapıları, gerilimin genliğinde titreşimler (flikler) ve harmonikler meydana getirebilir. Bu flikler bazı durumlarda gerilimi düzenleyici mekanizmaların tetiklenmesine (kademe değişimi gibi) sebebiyet verebilir bu da bara gerilimlerinde istenmeyen değişimlere neden olur. Gelişmiş sistemlerde hamonik ve flikler standartlar ile sınırlandırılmış olup, bağlanılan noktadaki kısa devre gücüne ve iletim mesafesi göz önünde bulundurularak analiz edilmesi gerekebilir [37]. İnverter yapıları dağıtık üretim tesislerinde, yenilenebilir enerji kaynağının (rüzgar, güneş vs.) anlık büyüklüğüne bağlı olarak çıkış geriliminde de değişiklikler görülebilir.
- Dağıtık üretim, şebekenin kısa devre akımı seviyesine etki eder. Dağıtım sisteminde meydana gelecek bir arıza her bir dağıtık üretimin arıza noktasına kısa devre katkısı vermesine sebep olur. Tek bir santralden gelecek olan katkı çok büyük olmayabilir ancak birden çok santralin arıza noktasını beslemesi hatırı sayılır bir etki meydana getirir. Bu katkı röle koordinasyonu açısından da sıkıntılar doğurabilir. Kısa devre katkısının değeri dağıtık üretimin tipine, kullanılan teknolojiye göre farklılık göstermektedir. Örneğin rüzgar santrallerinde bu katkı türbin çeşidine göre farklılık arz etmektedir. Çift beslemeli asenkron generatör (ÇBAG) yapıları türbinler ve tam ölçekli frekans konvertörü kullanımı arasında kısa devre katkısı bakımından 6 kata kadar fark görülebilir [34].

- Dağıtık üretim santrali bağlanacağı şebekenin topraklama ve transformatör sargı çeşidine uygun şekilde dizayn edilmelidir. Aksi takdirde olası bir faz toprak kısa devresi anında tesislerde oluşabilecek gerilim yükselmeleri tesisleri veya tüketici ekipmanlarını hasarlayabilir. Bu problemlerin önüne geçmek adına şebekenin topraklama yapısına uygun şekilde entegrasyon gerçekleştirilmelidir.
- Dağıtık üretim sistemlerinin en önemli problemlerinden biri adalaşma problemidir. Dağıtık üretimlerin ana elektrik şebekesinden ayrılmış olan bir kısım tüketiciyi beslemeye devam etmesi durumunda adalaşma meydana gelmektedir. İşletmeciler tarafından yapılan hatalı bir manevra , bağlantı hatlarında meydana gelebilecek bir kopma , bir kısa devre arızası durumunda şebekenin bir bölümünü ana şebekeden ayırabilir. Mevcut şebeke yapıları düşünüldüğünde adalaşmanın meydana geldiği bir durumda az sayıda kaynağa bağlı kalındığından frekans ve gerilim kontrolleri zorlaşmaktadır. Bu durum izolasyon, mekanik problemleri buna bağlı olarak da işletme ve can güvenliği sorunlarını beraberinde getirmektedir. Adalaşmanın meydana gelmesi durumunda işletme topraklamasının yapıldığı noktanın şebekenin dışında kalması durumu dolayısıyla topraklama sisteminin devreden çıkması durumu oluşabilir. Bu durumda olacak faz toprak kısa devrelerinde arızalı olmayan fazlarda aşırı gerilim yükselmeleri oluşabilmektedir [31,37]. Şebekenin bir bölümünde adalaşma meydana geldiğinde dahi dağıtık üretimin işletmeye devam etmesi mümkün olabilir ancak bu durumun sürdürülebilmesi için adalaşan bölgedeki üretim tesislerinin tüm yükü karşılayabilmesi gerekmektedir. Ayrıca gerilim regülasyonlarını etkin bir şekilde yapabilecek kapasitede olmalı ve işletme topraklamasının devrede kalmış olması gerekmektedir. Bu bölgenin yeniden şebekeye entegre olabilmesi için adalaşan bölge ile şebekenin senkron olduğu anda ilgili kesicinin kapatılması gerekmektedir [34].
- Dağıtık üretimin yer aldığı şebekede tekrar kapamalı kesiciler mevcutsa bu manevralar üretim tesisleri ile uyumlu çalışmalı ve olası problemler öngörülmüş olmalıdır [37]. Dağıtık üretim tesisleriyle koordineli çalışmayan tekrar kapama sistemi üretici ve tüketici için ciddi riskler doğurmaktadır. Tekrar kapama yapılmadan önce arızanın temizlendiğinden emin olunmalı, öncelikli olarak dağıtık üretimlerin bağlı bulunduğu sistem enerjilendirmeli

daha sonra da senkronizasyon koşullarının (faz sırası, voltaj değeri, frekans, faz açısı) oluştuğundan emin olunmalıdır. Aksi takdirde dağıtık üretim tesisinde büyük hasarlar meydana gelebilir.

2.3 Dağıtık Üretimin Gerilim Regülasyonuna Etkisi

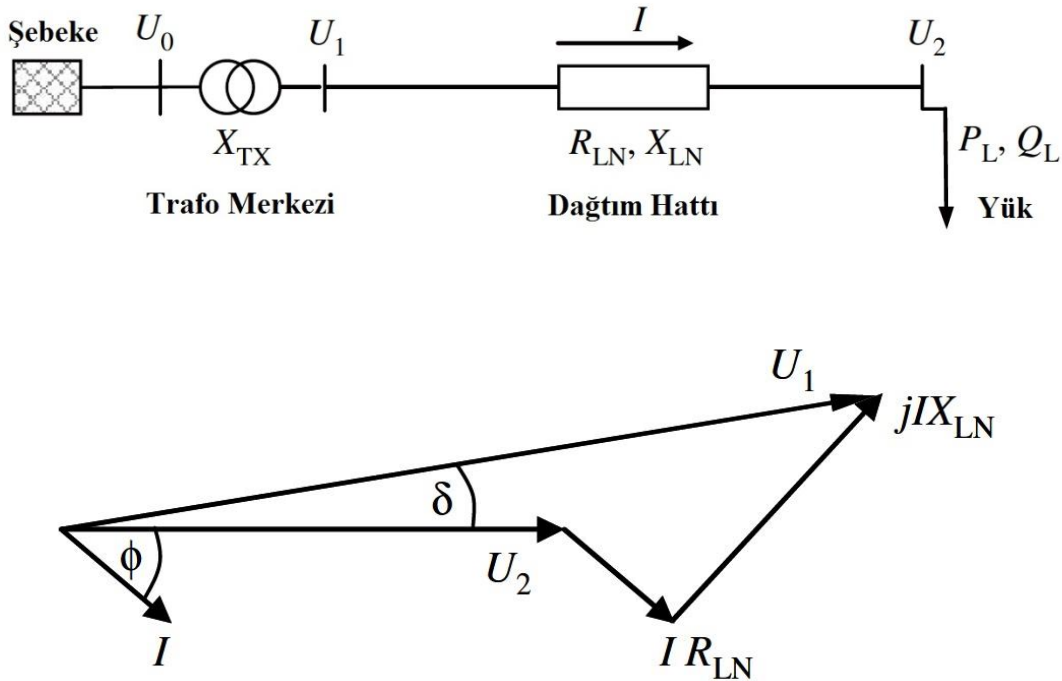
Modern dağıtım sistemleri, enerjinin iletim sisteminden dağıtım sistemine ve oradan da kullanıcılara dağıtılması prensibine dayanarak tasarlandığı dönemlerden beri, aktif ve reaktif güç akışları daima yüksek gerilim tarafından düşük gerilim taraflarına doğru olmaktadır. Ancak dağıtık üretim sistemlerinin elektrik şebekesinde hatırı sayılır oranda pay sahibi olmasıyla birlikte gerilim, dağıtık üretim tesislerinin yer aldığı hat sonlarında da yükselebilmekte ve güç akışları artık her iki yönde de olabilmektedir. Bu durum gerilim regülasyonuna, sistemin arıza anındaki davranışlarına ve koruma sistemlerinin tasarımına ciddi şekilde etki etmektedir. Bunun bir sonucu olarak da dağıtım sistemleri artık sadece yükleri besleyen pasif güç devreleri olmaktan çıkıp, güç akışlarına ve gerilim seviyelerine, dağıtık üretim tesisleri ve yükler vasıtasıyla etki edilebilen aktif sistemlere dönüşmüşlerdir [38].

Dağıtık üretim tesislerinin elektrik şebekelerine entegrasyonunda en düşündürücü sorun kararlı hal gerilimlerinin dağıtık üretimlerin bağlantı noktalarında dolayısıyla hat ortalarında ve hat sonlarında yükselmesidir. Gerilim seviyeleri bağlanılan şebekenin kriterlerinde izin verilen aralıkta yer almalıdır. Uluslararası standartların bir çoğunda bu limit $\pm\%10$ aralığında yer almaktadır. [2] standardı dağıtık üretimlerin şebekeye bağlantı şartlarından bahsetmektedir ve ANSI C84.1 standardına atıfta bulunarak dağıtık üretimlerin şebekeye bağlantı noktasında "Range A" olarak tanımlanmış olan aralıkta yer alması gerektiğini belirtmiştir. Bu aralık nominal gerilimin $\pm\%5$ 'ine tekabül etmektedir. Ülkemizde elektrik şebeke yönetmeliğinin ikinci bölümünde "66 kV ve altındaki iletim sistemi için gerilim değişimi $\pm\%10$ 'dur" ibaresi bulunmaktadır. Ayrıca dağıtım sisteminde 10 MW ve üzerinde kurulu güce sahip rüzgar santralleri ve lisanslı fotovoltaik santraller için $\pm\%10$ gerilim aralığının normal işletme koşulu olduğu belirtilmiştir. İlgili santraller bu gerilim aralığında yönetmelikte belirtilen reaktif güç desteği taleplerini karşılayabilmelidir [39]. Dağıtım sistemi bazında yönetmelikler incelendiğinde [40] yönetmeliğinde dağıtım sistemi işletmesinde kararlı durum gerilimleri için talep edilen değerleri şu şekilde tanımlamıştır:

OG seviyesi için; TS EN 61000-4-30'da tanımlanan ölçüm periyodu boyunca (kesintisiz bir hafta) ölçülen gerilim etkin değerlerinin 10'ar dakikalık ortalamalarının en az % 99'u beyan etkin gerilim değerinin + % 10'nu aşmamalı, yine bu ortalamaların en az %99'u beyan etkin gerilim değerinin - % 10'nun altına düşmemelidir [40].

Tezin uygulama bölümünde, bara gerilimlerinin uygunluğu ve simulasyon sonuçları bu kriter dahilinde değerlendirilmiştir.

Günümüzde dağıtım şebekelerinin büyük bir bölümü ilk etapta, radyal düzene sahip pasif şebekeler olarak dizayn edilmiştir. Dolayısıyla bir hatta aktif ve reaktif güç akışları güç akışı gerilimin yüksek olduğu noktadan düşük olduğu noktaya doğru olacaktır. İletim sisteminde reaktans ve direncin oranı $X/R \geq 10$ iken, dağıtım sisteminde ise bu oran $X/R \leq 0.5$ aralığındadır. Yani dağıtım sisteminde direnç iletim sistemine göre daha yüksektir. Bu yüksek direnç trafo merkezinden itibaren dağıtım sisteminde yer alan tüketiciye gelene kadar gerilimin düşmesine neden olmaktadır [38]. Genel anlamda gerilim düşümü Şekil 2.4'de verilen sistem için yine aynı şekildeki fazör diyagramı üzerinden görülebilir.



Şekil 2.4 : Radyal dağıtım sistemi tek hat şeması ve fazör diyagramı [41].

Kompleks ifadeler cinsinden akım \bar{I} , görünür güç $\bar{S} = P_L + jQ_L$ ve yük barasındaki gerilim ise \bar{U}_2 olarak tanımlanmıştır.

$$\bar{I} = \frac{\bar{S}^*}{\bar{U}_2^*} = \frac{P_L - jQ_L}{\bar{U}_2^*} \quad (2.1)$$

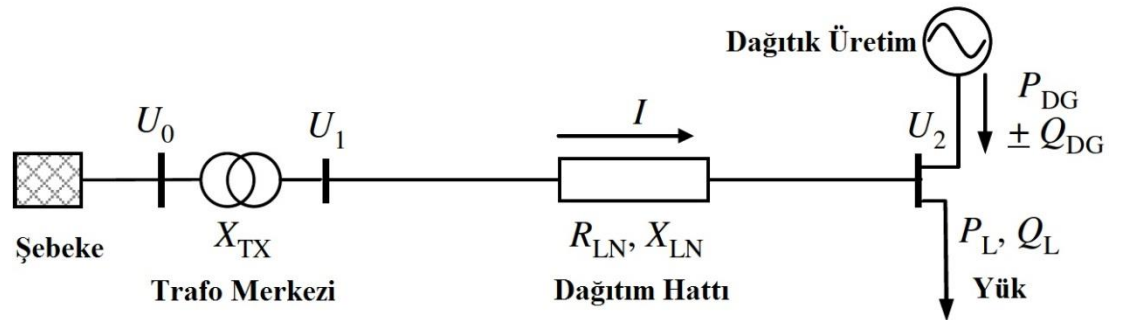
Gerilim düşümü ifadesi denklem 2.2'deki gibi hesaplanabilir.

$$\begin{aligned} \Delta U &= |\bar{U}_1 - \bar{U}_2| = |\bar{I} \cdot (R_{LN} + jX_{LN})| \\ &= \left| \frac{(R_{LN}P_L + X_{LN}Q_L) - j(X_{LN}P_L - R_{LN}Q_L)}{\bar{U}_2} \right| \end{aligned} \quad (3. \quad (2.2) \quad 1)$$

Dağıtım sisteminin bazı bölümlerinde taşınan gücün düşük olduğu noktalarda U_1 ve U_2 arasındaki faz açısı da δ küçük olacağından gerilim düşümü denklem 2.3'deki gibi de ifade edilebilir.

$$\Delta U \approx \frac{(R_{LN}P_L + X_{LN}Q_L)}{U_2} \quad (2.3)$$

Dağıtık üretim şebekeye senkron, asenkron generatör veya güç elektroniği sistemi üzerinden bağlanabilir. Dağıtık üretim yapıları gereği farklı güç faktörlerinde çalışma yeteneğine sahiptirler. Dağıtık üretimler şebekeden reaktif güç çekebileceği gibi şebekeye reaktif güç desteği de sağlayabilir. Bu sayede dağıtım sistemde gerilim kontrolünün önemli bir parçası olmuşlardır. Dağıtık üretim ve yükün birlikte yer aldığı bir dağıtım sistemine ait tek hat diyagramı Şekil 2.5'de gösterilmiştir.



Şekil 2.5 : Dağıtık üretimin mevcut olduğu bir dağıtım sisteminin tek hat şeması [41].

Gerilim düşümü ifadesi Şekil 2.5'den de faydalanılarak dağıtık üretimin de entegre edilmesiyle denklem 2.4'deki gibi düzenlenir.

$$\Delta U = U_1 - U_2 = \frac{R_{LN}(P_L - P_{DG}) + X_{LN}(Q_L - (\pm Q_{DG}))}{U_2} \quad (2.4)$$

Denklem 2.4'ü yorumlamak gerekirse, eğer dağıtık üretim santrali reaktif güç üretir veya şebeke ile reaktif güç alışverişine girmez ise, dağıtık üretim hat boyunca gerilim düşümünü azaltacaktır. Eğer üretilen enerji bağlantı noktasındaki yükten fazla ise güç akışı dağıtık üretimin olduğu noktadan trafo merkezine doğru olacaktır ve dağıtık üretim barasındaki gerilimin yükselmesine sebep olacaktır. Bunlara ilave olarak, eğer dağıtık üretim şebekeden reaktif güç çeker ise, dağıtık üretimin aktif ve reaktif gücü ile yükün aktif ve reaktif gücü arasındaki ilişki ve hattın X/R oranına göre gerilim düşümünü artııcı veya azaltıcı yönde etki yapabilir [38].

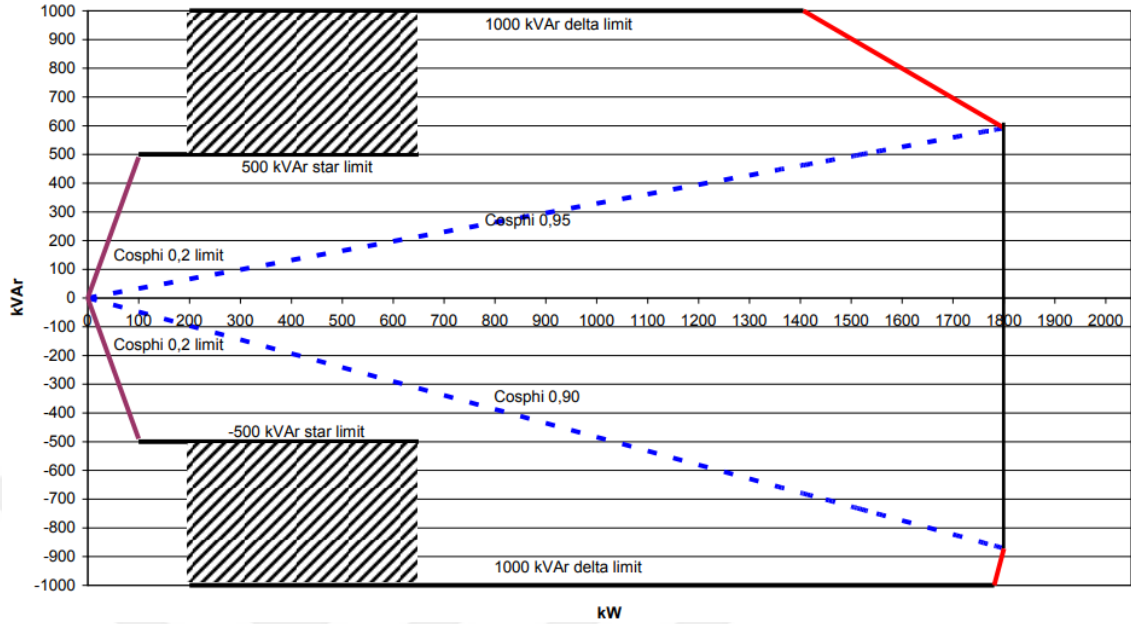
Dağıtık üretim tesisi şebekeye dahil olacak ise sorunsuz bir entegrasyon için gerilim seviyesini izin verilen limitlerin dışına çıkarabilecek en kötü senaryolar değerlendirilmelidir. Bağlantı noktası gerilimi açısından en kötü senaryolar: asgari yük, azami üretim; azami yük, asgari üretim olarak özetlenebilir.

2.4 Dağıtık Üretim Kaynaklarının Şebeke Kayıplarına Etkisi

Dağıtık üretimin şebeke kayıplarına da etkisi vardır. Hattaki kayıpları azaltmak adına dağıtık üretimlerin bağlanacağı nokta optimize edilebilir. Dağıtık üretimin şebekeye bağlantı yapacağı noktada gerilimi dağıtık üretim vasıtasıyla yükseltme imkanı olacaktır. Bunu dağıtım şebekelerinde gerilim düzenlemek adına kullanılan kondansatöre benzetebiliriz. Kondansatörler bara gerilimini düzenlemek için şebekeye sadece reaktif güç kapsamında etkide bulunabilirken, dağıtık üretimler kondansatörlere kıyasla reaktif ve aktif üretim anlamında etki edebilmektedirler [42]. Örneğin konvertör yapısına sahip bir rüzgar türbini, tasarımına da bağlı olarak ± 0.85 gibi güç faktörü aralığında çalışabilir. Günümüzde kullanılan modern 1.8 MW bir rüzgar türbinine ait reaktif güç kapasitesine ait diyagram Şekil 2.6'da verilmiştir. Şekilden anlaşılacağı üzere örnek rüzgar türbininin reaktif güç kapasitesi ± 1000 kVAr aralığına kadar çıkabilmekte, tam güçte üretim yaptığı durumda 600 ile -900 kVAr aralığında çalışabilmektedir.

Dağıtık üretimlerin şebeke kayıpları üzerindeki etkilerini önceden kestirmek adına yük akışı analizi yapabilen yazılımlar üzerinden yük akışı analizleri yapılabilir,

rüzgar türbini gibi santrallerin reaktif güç kapasitelerinin sınır değerlerinin etkileri bu şekilde öngörülerek daha güvenilir ve optimal tasarımlar yapılabilir.



Şekil 2.6 : 1.8 MW Rüzgar türbini reaktif güç kapasite eğrisi.

Örneğin kayıpların yüksek olduğu hatta, kayıpları önlemek adına hattın talep yükünün %10-20'sini karşılayacak küçük güçlü dağıtık üretim santralini belirlenen stratejik noktaya bağlamak kayıpları azaltmakta etkili bir çözüm olacaktır ancak dağıtım sistemi operatörleri ve yatırımcılar açısından bunun her zaman mümkün olmayacağı da aşikardır. Yine de böyle bir ihtimalin olduğunun bilinmesinde fayda vardır.

Dağıtık üretimlerin bağlantı noktasının belirlenmesinde hattın mesafesi ve mevcut hatların akım taşıma kapasiteleri hem güç kayıpları hem de gerilim limitlerine uyulması açısından önem arz etmektedir. Hava hatları veya kablolar gerilim limitleri açısından sorun yaratmadığı durumlarda hattın termal limitlerinin aşılmasına sebebiyet verebilir. Tam kapasiteli üretim koşulları altında termal açıdan limitlerin aşıldığı veya limitlere dayanıldığı noktalar mevcut ise güç kayıpları açısından optimal bir bağlantının söz konusu olamayacağı söylenebilir [42].

2.5 Dağıtık Üretimin Kısa Devre Akımına Katkısı

Şebekeler tasarım aşamasında, normal işletme koşulları, arıza durumları ve aşırı yüklenme durumları için yerel yönetimlerin ve standartların belirlediği sınırlar çerçevesinde değerlendirilirler. Dağıtık üretimlerin şebekeye bağlantısı, şebekenin

kararlı haldeki işletme koşullarında değişikliklere neden olduğu gibi şebekenin arıza anındaki tepkilerinde üzerine düşünülmesi gereken farklılıklar yaratmaktadır. Dağıtım sisteminde arıza meydana geldiği an sistemde yer alan döner alanlı yükler ve üretim tesisleri tarafından arıza noktasına doğru bir akım akmaya başlar. Bu arıza akımı sistemde yer alan ölçüm trafoları tarafından algılanır, sonrasında koruma koordinasyonu açısından ilgili kesici veya sigorta ile anahtarlama yapılarak sistemden temizlenmesi gerekir.

Tasarım aşamasında arıza akımı seviyeleri, işletme koşulları ve seçilen ekipmanların dayanımları bazında sorun teşkil etmemelidir. Ulaşılabilecek azami hata akımı daha evvelden nümerik yollarla veya güç sistemleri analiz programlarıyla öngörülmüş olmalıdır. Eğer hata akımı sistemde bulunan kablo ve havai hat gibi ekipmanların kısa devre dayanımlarının üzerinde ise hata akımını azaltmak adına ek önlemler almak gerekebilir. Bunlar şebeke içi bağlantı noktalarının revize edilmesi ve farklı bağlantı opsiyonlarının gündeme alınması olabileceği gibi hata akımının sınır değerleri aştığı noktalarda sisteme kısa devre akımını sınırlayan ekipmanların dahil edilmesi de olabilir. Kısa devre dayanımları yeterli gelmeyen ekipmanların bir üst kısa devre dayanımına uygun olanlarla değiştirilmesi de bir çözüm olabilmektedir.

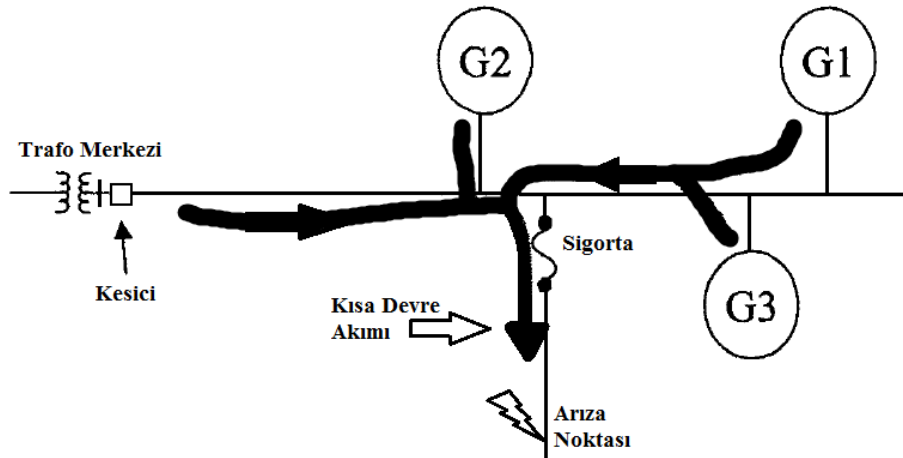
Şebekelere dağıtık üretimlerin dahil edilmesi kısa devre akımına da katkı sağlamalarına sebebiyet vermektedir. Genelde küçük çaplı kurulu güce sahip olan dağıtık üretimlerin şebekede birden çok sayıda yer alacağı düşünülürse arıza akımına yapacakları katkı da göz ardı edilemeyecek seviyelere ulaşır [42]. Dağıtık üretimin yapısındaki farklılıklar şebekeye yapacakları arıza akımı katkısı açısından da farklılıklar meydana getirmektedir. Bu farklılıklara sebep olan etmenler şu şekilde sıralanabilir [43]:

- Dağıtık üretim ile arıza noktası arasındaki mesafe ne kadar uzun olursa araya girecek olan enerji iletim ekipmanlarının empedansları da devreye dahil olacağından arıza akımı da bir o kadar azalacaktır.
- Dağıtık üretim ile arıza noktası arasında bir trafo yer alıyor ise - üretimi yapan sistemin gerilim seviyesini dağıtım sisteminin gerilim seviyelerine getirmek için kullanılır - trafonun kısa devre empedansı kısa devre akımını kısıtlayıcı yönde etki yapacaktır.
- Dağıtık üretim ve hata noktası arasındaki şebeke modeli kısa devre akımının genliğine etki eder. Daha açıklayıcı yazmak gerekirse arıza noktası ile dağıtık

üretim arasındaki, arıza akımının akış güzergâhının farklılığı, arıza akımının büyüklüğüne doğrudan etki edecektir.

- Güç elektroniği devreleri üzerinden sisteme bağlanan dağıtık üretim tesisleri doğrudan bağlı üretim tesislerine oranla çok daha düşük arıza akımı katkısı vermektedirler.

Dağıtık üretimin şebekenin arıza akımına katkı vermesi, dağıtım sisteminin işletme güvenilirliğini azaltıcı yönde etkileri olabilmektedir. Birden çok sayıda dağıtık üretimin yer aldığı dağıtım sisteminde bir arızanın meydana geldiği durum Şekil 2.7'de gösterilmiştir. Şekil 2.7'de dağıtım sisteminin bir dalında yer alan arıza anında G1, G2 ve G3 dağıtık üretimlerinin ayrı ayrı arıza akımı katkılarına olduğu ve arıza noktasını beslediği görülmektedir. Böyle bir durumda dağıtık üretimlerin arıza akımı katları sebebiyle arıza akımının, koruma koordinasyon sisteminin tasarımı aşamasında öngörülme değerlere çıkması muhtemeldir. Bunun sonucu olarak da kısa devre arızası anında sigorta-kesici arasındaki koordinasyonun istenildiği şekilde çalışmama ihtimali ortaya çıkacaktır. Bu durum istenmeyen sigorta açmaları ve şebeke güvenilirliğinin azalması gibi sonuçları beraberinde getirecektir.



Şekil 2.7 : Dağıtık üretimlerin kısa devre akımına katkısı [42].

Geniş alanlara yayılmış birden çok dağıtık üretimin dahil olduğu şebeke modellerinde kısa devre akımı katkılarına en hızlı ve güvenilir yolu güç sistemi analizi yapan yazılımlar kullanmaktır. Koruma koordinasyonu açısından kesicilerin açma süre ve sıralarını belirlemek için yazılımda modellenen şebeke farklı arıza durumlarında analiz edilmelidir. Aşırı akım, faz toprak arızası gibi durumlar için ayar ayrı değerleri belirlenmelidir. Dağıtık üretimlerin yapısal farklılıkları arıza akımı katkılarında farklılık oluşturduğu için dağıtık üretimlerin yazılımda doğru bir şekilde

modellendiğinden emin olunmalı. Farklı lokasyonlarda meydana gelebilecek arıza durumlarında kesiciler üzerinden geçen en yüksek ve en düşük hata akımları incelenmelidir.

2.6 Dağıtık Üretimin Şebekeye Bağlantı Kriterleri

Dağıtık üretim tesislerinin şebekeye güvenli bir şekilde bağlanabilmesi için dünya genelinde ve ülkemizde şebeke kriterleri belirli yönetmelik ve yönergeler çerçevesinde kontrol edilmektedir. Bu yönetmelik ve yönergeler üretim tesislerinin, reaktif güç kapasite eğrileri, reaktif güç desteği kapasiteleri, arıza sonrası sisteme katkıları, frekans tepkileri, bağlantı noktası gerilimi gibi kriterler bakımından değerlendirilmesini talep etmektedir.

Ülkemizde de bu tür üretim tesisleri iletim sisteminden bağlanacak ise şebeke yönetmeliğine uyumluluğu incelenmelidir. Eğer tesisin bağlantı gerilimi dağıtım şebekesi seviyesinde ise dağıtım yönetmeliği çerçevesinde incelenmelidir. Dağıtım seviyesinden yapılacak bağlantılar iletim sistemini de etkileyeceğinden iletim sistemi açısından da değerlendirilmelidir [37]. Ülkeler arası iletim sistemi bağlantısı söz konusu ise ilgili uluslar arası standartlar ve iki ülke arasındaki teknik sözleşmeler bağlayıcı nitelikte olacaktır [34].

İletim ve dağıtım sistemlerinden bağlanan dağıtık üretim tesisleri için, tesislerin uygunluğu aşağıda verilen yönetmelik ve tebliğler çerçevesinde incelenmektedir.

- Elektrik Şebeke Yönetmeliği [39]
- Elektrik Piyasası Lisans Yönetmeliği [44]
- Elektrik Piyasası Dağıtım Yönetmeliği [45]
- Elektrik Piyasası Yan Hizmetler Yönetmeliği [46]
- Elektrik Dağıtım ve Perakende Satışına İlişkin Hizmet Kalitesi Yönetmeliği [40]
- Elektrik Piyasasında Lisanssız Elektrik Üretimine İlişkin Yönetmeliğin Uygulanmasına Dair Tebliğ [47]
- TEDAŞ, Dağıtım Tesislerine Bağlanacak Üretim Santralleri İçin Fider Kriterleri [48]
- Dağıtım Şirketleri Uygulamaları

Elektrik şebekesine bir üretim tesisi entegrasyonu söz konusu olduğunda gerçekleştirilmesi gereken bazı temel şebeke analizleri vardır. Bu analizlerin amacı tasarım aşamasında öngörülmeyen işletme durumları meydana geldiğinde sistemin sürdürülebilirliği ve güvenilirliğini kontrol etmektir. Ayrıca yukarıda verilen yönetmeliklerde üretim tesislerinden beklenen teknik yeterlilikler bu analizler neticesinde gözlemlenebilir. Söz konusu şebeke analizleri ve temel sebepleri aşağıdaki belirtilmiştir [37].

- **Yük Akışı Analizi:** Farklı yük ve üretim koşullarında sistemdeki akışların incelenmesi, bara gerilimlerinin izin verilen limitler dahilinde olup olmadığının incelenmesi, mevcut ekipman dayanımlarının kontrol edilmesi, ekipman boyutlandırması, koruma koordinasyon tasarımının geliştirilmesi gibi amaçlarla yapılmaktadır.
- **Kısa Devre Analizi:** Arıza durumunda sistemde oluşacak kısa devre akım değerlerini görerek bu çerçevede mevcut ekipmanların (paneller, kablolar, kablo başlıkları vs.) dayanımlarını ve aşırı akım koruma koordinasyon yapısının kontrolünü gerçekleştirmektir.
- **Harmonik ve Fliker Analizi:** Dağıtık üretimin sistemde oluşturduğu harmonik ve flikerlerin incelenerek ilgili yönetmeliklerin sınır değerleri dahilinde olup olmadığının kontrol edilmesine olanak sağlamaktadır.
- **Dinamik Analizler:** Sistemin anlık tepkilerini ölçmek, dağıtık üretimlerin sistemden ayrıldıktan sonra yeniden şebekeye bağlanma anında yönetmeliğin belirlediği kriterler açısından tepki hızlarının kontrolü.
- **Topraklama Analizleri:** Sisteme dahil olan dağıtık üretimin topraklama sisteminin tasarımı ilgili standartlar çerçevesinde kontrolü açısından yapılmaktadır. Özellikle rüzgar santrallerinde toprak özgül direnci değeri çok yüksek olabilmekte adım ve dokunma gerilimleri açısından ek önlemler gerekebilmektedir.
- **Yalıtım Koordinasyonu Analizi:** Aşırı gerilim yükselmelerinin muhtemel zararlarının önlenmesi amacıyla yapılmaktadır. Gerilim yükselmeleri kesicilerin pozisyon değiştirme anlarında, yıldırım düşmesi gibi anlarda meydana gelebilmektedir. Sistemdeki ekipmanların bu gibi durumlar için uygun dayanımda seçilmesi önem arz etmekte, uygun koruma fonksiyonları ve topraklama sistemi tasarımları ile çözüm bulunması gerekmektedir.



3. GERİLİM KONTROL EKİPMANLARI

Dağıtık üretimlerin elektrik şebekelerindeki oranının artması elektrik şebekelerinin yapısını günden güne değiştirmektedir. Önceleri sayıca az ancak kurulu güç olarak yüksek mertebelerde bulunan merkezi santraller elektrik şebekesinin kalbini oluşturmaktaydı. Merkezi santrallerdeki üretim gerilimi yüksek gerilime çıkartılır, iletim hatlarıyla iletilir orta gerilime ve alçak gerilime indirilerek radyal hatlar boyunca tüketicilere ulaştırılırdı. Son yıllarda dağıtım şebekesine bağlanan dağıtık üretimlerin sayısı artmaktadır. Bu durum enerji akış yapısının tek yönlü geleneksel yapıdan, çift yönlü aktif şebeke yapısına evrilmesini beraberinde getirmiştir.

Gerilim ve frekans şebekenin farklı noktalarında farklı değerlere sahiptir. Gerilim seviyesini etkileyen faktörler üretim, iletim ve dağıtım işlemlerinin her biri için farklılık gösterir. Ancak en önemli faktörlerin yük miktarının ve dağıtık üretimlerin üretim değerlerinin değişimleri olduğunu söyleyebiliriz. Bir diğer önemli etmen ise reaktif güç üretim ve tüketim seviyesi arasındaki dengedir. Örneğin reaktif güç tüketimi, üretim miktarının üzerine çıkar ise o noktadaki gerilim seviyesinin düşeceğini söyleyebiliriz.

Dağıtık üretimlerin yer almadığı geleneksel dağıtım şebekelerinde gerilim, hat empedansına bağlı olarak hat sonuna doğru düşmekteydi. Gerilim düşümünün en yüksek oranda gözlemlendiği yer talep yüküne de bağlı olarak hattın en uç noktalarıydı. Dağıtık üretimlerin dağıtım şebekelerine bağlanmasıyla birlikte gerilim değerlerinde alışlagelmişin dışında değerler elde edilmeye başlanmıştır. Gerilim düşümünün hat sonlarına doğru artması beklenirken, dağıtık üretimlerin hattın farklı noktalarında dağıtım şebekelerine bağlanması farklı bir senaryoyu daha gözler önüne getirmiştir. Şöyle ki, dağıtık üretimin ürettiği güç miktarı o bölgedeki yük talebinin üzerine çıkar ise güç akışı tersine dönecek ve dağıtık üretimin bağlandığı barada gerilim artışı gözlenecektir. Dolayısıyla dağıtık üretimin üreteceği güç miktarı ve talep yüklere de bağlı olarak bara gerilimlerinde, uluslar arası standartlar ve yerel dağıtım şirketlerinin belirlediği, izin verilen aralıkların dışına çıkmalar olabilmektedir. Dağıtım şebekelerindeki dağıtık üretim oranının artmaya devam edeceği gerçeği,

dağıtım sistemi işletmecilerinin gerilim seviyesini izin verilen aralıkta tutmak için yeni stratejiler geliştirmeye yöneltmiştir.

Dağıtım sistemleri, tasarım aşamasında gerilim regülasyonu sorunlarını yaşamamak, hatların kapasitelerini kontrol etmek ve talep yükleri karşılayacak bir sistem oluşturmak adına güç akışı analizleriyle dizayn edilmektedir. Ancak dağıtık üretimlerin bağlanmasıyla birlikte, dağıtık üretim santrallerinin üretim miktarının gün içinde değişkenlik göstermesi, şebekenin sürekliliğini ve güvenliğini sağlamak adına daha komplike kontrol sistemleri ihtiyacını doğurmaktadır [49]. Geleneksel yöntemlerde daha pasif gerilim kontrol sistemleri kullanılırken gelişen ihtiyaçlar dahilinde şebekeler daha bir aktif hal almaya başlamışlardır. Yeni araştırmalar aktif şebeke kontrol yöntemlerini ve gerilim kontrol ekipmanlarının gerekliliğini işaret etmektedir. Reaktif güç kompanzasyonu ve gerilim kontrolü için aşağıda belirtilen yöntem ve ekipmanlardan bahsedebiliriz [50]:

- Yük altında kademe değiştirici (YAKD)
- Şönt kondansatör
- Şönt reaktör
- Kademeli gerilim regülatörü (SVR)
- Statik reaktif güç kompanzatorları (SVC)
- Senkron kompanzator
- Statik senkron kompanzator (STATKOM)
- Dağıtık üretimin aktif ve reaktif güç kontrolü

3.1 Yük Altında Kademe Değiştirici (YAKD)

Yük altında kademe değiştirici, uygulaması ve tasarlanması en basit yöntemlerin başında geldiği için gerilim düzenlemede kullanılan en yaygın ekipmandır. Bazı durumlarda kullanılması şebeke işletmecisi kurumlar tarafından zorunlu kılınmıştır. Örneğin ülkemizde iletim sistemine bağlanan rüzgar santralleri için Elektrik Şebeke Yönetmeliği Ek-18 kriterleri dahilinde "İletim sistemine doğrudan bağlı rüzgar ve/veya güneş enerjisine dayalı üretim tesislerinin şebeke bağlantı transformatörleri yük altında otomatik kademe değiştirme özelliğine sahip olmak zorundadır." ibaresi yer almaktadır [39].

Sistem gerilimi, belirlenen ayar değerini aşar ise yük altında kademe değiştiriciler devreye girerek trafonun çevirme oranını değiştirirler. Genellikle otomatik voltaj kontrol rleleriyle (AVC) birlikte görev yapmaktadırlar [49]. AVC rölesi trafonun düşük gerilim tarafındaki gerilim bilgisini sürekli olarak izler ve kademe değiştiricisinin ayar değeriyle kıyaslar. Daha sonra trafonun kademe değiştiricisine gerekli gördüğü taktirde kademe değiştirme komutu gönderir. Trafonun kademesinde yapılan değişiklik trafonun çıkış geriliminin değişmesine neden olur bu değişim gerilimin yükselmesi ya da alçalması yönünde olabilir. Kısa süreli gerilim değişimlerinde YAKD'nin gereksiz kademe değişimi yapmasının önüne geçmek adına AVC rölesinde bir gecikme zamanı tanımlanabilmektedir [51]. Kademe değiştiricinin bakım masrafları yaptığı operasyon sayısıyla doğru orantılı olarak artmaktadır. Bu sebepten dolayı da gereksiz operasyonlardan kaçınmak ve beklenmedik gerilim dalgalanmalarına tepki vermemek adına gecikme süresini olabildiğinde uzun seçme şeklinde bir yönelim vardır. Ayrıca trafonun kademe değişimine tepki vermesi, şalterlerin kademe değiştirme operasyon süresi nedeniyle 5-10 sn arasında mekanik bir gecikmeye de neden olmaktadır. Bu sreden de anlaşılacağı gibi yük altında kademe değiştiriciler kısa süreli darbe gerilimlerine tepki veremezler.

Uzun bir radyal şebekenin indirici dağıtım merkezinde yer alan bir YAKD, hattın gönderici noktasındaki gerilimini düzenleyebilmektedir. Ancak hattın uzun olduğu düşünüldüğünde hattın u noktasında meydana gelecek bir gerilimi düzenlemek için gönderici noktasındaki gerilimde çok fazla miktarda değişiklik yapmak gerekebilir bu da istenmeyen bir sonuç olan, gönderici noktasındaki gerilimin izin verilen limitlerin dışına çıkmasına neden olabilir [49]. Bu gibi durumların önüne geçmek adına radyal şebekelerde YAKD operasyonu son çare olarak kullanılmakta, dağıtık voltaj kontrol yöntemleriyle lokal gerilim kontrol ekipmanlarını kullanarak istenilen seviyeye çekmek tercih edilmektedir.

3.2 şönt Kondansatör

Kondansatörlerin elektrik şebekelerinde birden çok kullanım alanı vardır. Reaktif güç kaynağı olarak hat ve toprak arasında konumlandırılabilirdikleri gibi bazı durumlarda kondansatörler, uzun hatların empedansını düşürmek adına iletim hattına

seri bağlanabilmektedirler. Ancak bu başlık altında şönt olarak bağlanan kondansatörlerden bahsedilecektir.

Şönt kondansatörler pasif şebekelerden beri gerilimi düzeltmek için kullanılan yüksek verimli bir ekipmandır. Ekipmanın temel kullanım amacı güç faktörünü düzeltmektir ($\cos\phi = 1$ seviyesine yaklaştırmak). Şönt kondansatörler aşırı yüklenme durumlarında şebekeye reaktif güç desteği sağlayarak gerilimi yükseltmek ve kayıpları azaltmak gibi amaçlarla kullanılabilir. Ancak dağıtık üretimlerin dağıtım şebekelerine dahil olması, dağıtık üretimin bağlandığı noktalarda, talep gücün üzerinde üretim olduğu durumlarda gerilim yükselmelerinin görülmesine sebep olmuştur. Gerilimin izin verilen işletme limitlerinin dışına çıkması sadece kapasitif değil endüktif bir ekipman gereksinimini beraberinde getirdi. Bu durum şönt kondansatör kullanım alanını sınırlandırmış oldu [29].

Şönt kondansatörler dağıtım şebekelerinde gerilimi düzenlemesinin yanında, endüktif yüklere reaktif güç sağlamak amacıyla ilgili yükün yakınına da yerleştirilebilir. Bu sayede hat boyunca akacak olan akımın miktarı azaltılmış, hat boyunca gerilim profili düzenlenmiş ve kayıplar azaltılmış olur. Akımın azalması, hatta yapılabilecek ilavelere imkan tanır bir anlamda hattın kapasitesi de artırılmış olur. Ayrıca hat üzerinde bulunan ekipmanların daha az yüklenmesini ve bu ekipmanların kullanım süresinin uzamasını sağlamış olur.

Kondansatörler etki ettikleri sistemdeki ihtiyaca yönelik boyutlandırılırlar. Sabit güçlü kondansatörler seçilebileceği gibi, talep yükün gün içerisinde değiştiği durumlarda şönt kondansatörler kademeli olarak da seçilebilir ve kontrol mekanizmaları kademelerde değişim yaparak gerekli oranda reaktif güç sisteme verilmiş olur.

Şönt kondansatörler sistemde trafo merkezlerinde veya yük tarafına yakın noktalara yerleştirilebilirler. Kondansatörlerin optimal bir şekilde konumlandırılmasıyla ilgili farklı tekniklere dayalı birçok çalışma mevcuttur. Bu yöntemler analitik, nümerik, buluşsal (heuristic), yapay zeka olarak sıralanabilir [52].

3.3 Şönt Reaktör

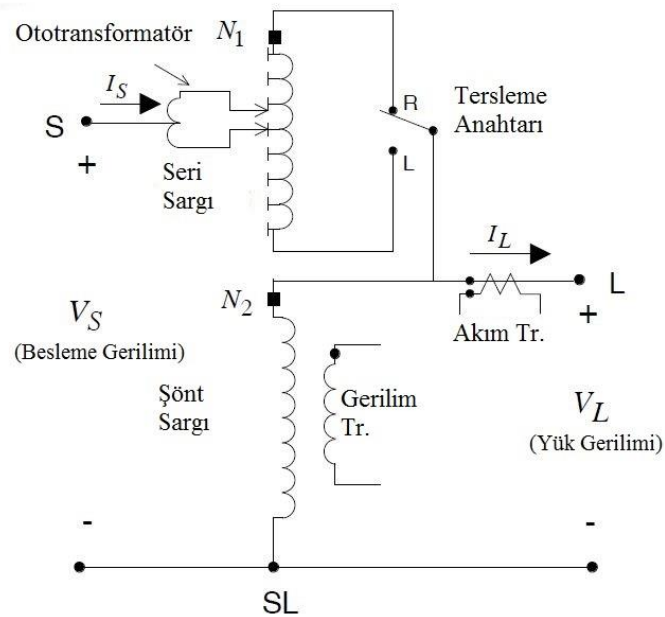
Şönt reaktörler şönt kondansatörler gibi şebekenin reaktif gücünü dengeleyerek gerilim profilini düzenlemeyi amaçlayan ekipmanlardır. Sabit güçlü veya kademeli

olarak devreye sokulabilen yapıda olabilirler. Reaktif güç akışının ve buna bağlı olarak gerilim seviyesinin istenilen sınır aralığında tutulmasına sağlarlar. Tasarım olarak şönt kondansatörlerin reaktif versiyonunu olduğunu söylemek yanlış olmaz.

Kademeli şönt reaktörler şebekeye bağlantı noktalarında istenilen gerilim ve reaktif güç aralığında kalmakta problem yaşayabilen dağıtık üretimlerin (rüzgar, fotovoltaik vs.) bulunduğu dağıtım şebekelerinde bu limitlerde kalmak adına fayda sağlayabilmektedirler. Ayrıca değişken yüklenme koşullarına sahip yer altı kabloları veya havai hatlarda kayıpları azaltmak ve güç kalitesini artırmak amacıyla kullanılmaktadırlar.

3.4 Kademeli Gerilim Regülatörü

Kademeli gerilim regülatörleri (SVR) temel olarak, şönt yüksek gerilim sargısı ve seri alçak gerilim sargılarına sahip, sisteminin gerilimini okuyan bir cihaz ile birlikte çalışan bir ototransformatördür (Şekil 3.1). Dağıtım merkezlerine veya tüketiciye yakın olan noktalara yerleştirilebilirler. Gerilimin nominal değeri izin verilen değerlerin dışına çıktığında bu durum gerilim ve akım trafosundan okunan değerler ile fark edilir ve voltaj regülatörü girişindeki yüksek veya düşük gerilim seviyesini regüle ederek çıkış gerilimini düzenler, bu sayede gerilim aşımı problemini ortadan kaldırır.



Şekil 3.1 : Tip B Tek Fazlı Kademeli Voltaj Regülatörü [53].

Kademeli voltaj regülatörleri voltaj regüle etme işlemini, seri sargısındaki kademeyi değiştirerek yapmaktadır. Voltaj regülatörleri genellikle giriş gerilimini $\pm 10\%$ oranında bir aralıkta 16 kademe yükseltip, 16 kademe alçaltarak toplamda 32 kademe ile sistem gerilimine müdahale edebilirler. Her bir kademe regülatörün çıkış gerilimde $5/8$ (0.625) oranında bir değişim etkisine sahiptir. Voltaj regülatörleri ANSI ve IEEE standartlarında [54] tip A ve tip B olarak iki farklı yapıda tanımlanmıştır. Yaygın olarak kullanılan regülatörler tip B yapısındadırlar, bu yapı gereği primer sargılar kademeler üzerinden regülatörün seri sargılarına bağlıdır. Seri sargılar regüle edilen devreye bağlı şönt sargılara bağlanmaktadır.

3.5 Statik VAr Kompansatörler

Gerilim seviyesini iyileştirmeye yönelik ekipmanlardan bir tanesi de statik reaktif güç kompensatörleridir. SVC'lerin temel kullanım amaçları reaktif güç kompanzasyonu yapmak, gerilim dalgalanmalarının etkilerini azaltmak, gerilim profilini düzenlemek olarak sıralanabilir. Bağlandığı noktadaki reaktif güç akışını güç elektroniği ekipmanlarını kullanarak kontrol eder. SVC'ler bağlandıkları bölgedeki bara gerilimlerinin izin verilen limitler dahilinde kalabilmesi adına şebeke ile endüktif veya kapasitif akım alışverişinde bulunabilen ekipmanlardır.

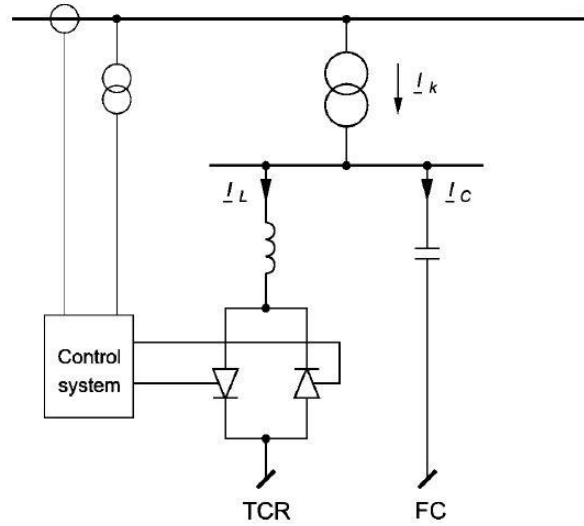
SVC'ler sistemden reaktif güç çekerek veya sisteme reaktif güç enjekte ederek gerilimi regüle ederler. Örneğin sistemdeki endüktif yükler artar veya herhangi bir sebeple sistemdeki bara gerilimleri izin verilen değerlerin altına düşer ise SVC kondansatör banklarını devreye alarak sisteme reaktif güç desteği sağlar ve bara gerilimlerini yükseltmeye yardımcı olur. Aksi durumda yani bara gerilimlerinin izin verilen değerlerin üzerine çıktığı bir anda SVC reaktörlerini devreye alarak sistemden reaktif güç çeker ve bara gerilimlerini düşürücü yönde etki yapar.

SVC'ler yapıları bakımından farklı tipte kompanzasyon devrelerine sahip olabilirler yaygın olarak kullanılan üç farklı kombinasyon aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Sabit kondansatörlü ve tristör kontrollü reaktörler (TCR/FC)
- Tristör kontrollü kondansatörler (TSC)
- Tristör kontrollü reaktörler ve tristör kontrollü kondansatörler (TCR/TSC)

3.5.1 Sabit kondansatörlü ve tristör kontrollü reaktörler

Bu yapıdaki SVC'ler Şekil 3.2'de görüldüğü gibi bağlantı trafosunun arkasında iki paralel kola sahiptirler. Bu kollardan biri sabit kondansatör gruplarını içerirken diğer kol tristörler tarafından anahtarlanan reaktörleri içerir. Tristörlerin bağlantısı yıldız veya üçgen şekilde yapılmış olabilir [50]:



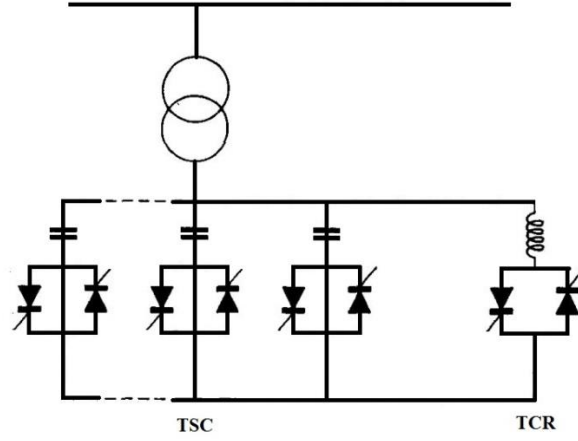
Şekil 3.2 : TCR/FC kombinasyonuna sahip SVC'nin şematik gösterimi [50].

3.5.2 Tristör kontrollü kondansatörler

Tristör kontrollü kondansatör yapısına sahip SVC'ler bağlantı trafosunun sonrasında üçgen veya yıldız bağlı şekilde bulunan kondansatör gruplarını içerir. Kondansatör grupları istenildiği şekilde anahtarlanarak sisteme reaktif güç enjekte edilebilir. Üçgen bağlantılı TSC'ler 3.harmonik bileşeni kendi içerisinde çevirir, güç sistemine aktarmaz. Bu sebeple genellikle kondansatör grupları üçgen bağlı olan TSC'ler tercih edilir. Tristörler birbirine ters yönde ve paralel bağlanmışlardır [55].

3.5.3 Tristör kontrollü reaktörler ve tristör kontrollü kondansatörler

TCR ve TSC gruplarını içerir. Bu kombinasyonda yük akımının reaktif bileşeni, gerilimin sıfır anında ölçülür. Ölçülen bu değer neticesinde tristörlerin tetikleme açıları belirlenerek SVC'nin reaktif güç çekmesi veya enjekte etmesine karar verilmiş olur. Bu yapıdaki SVC'ler Şekil 3.3'de gösterilmiştir.



Şekil 3.3 : TSC/TCR kombinasyonuna sahip SVC'nin şematik gösterimi [55].

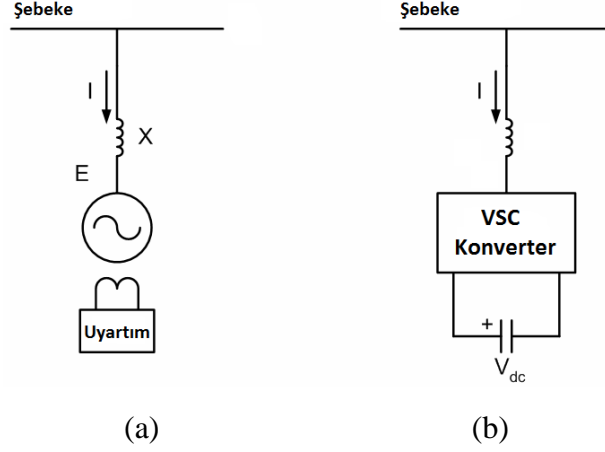
3.6 Senkron Kompansatör

Dağıtım ve iletim sistemlerinde yer alan, değişken yüklenme durumlarında şebeke gerilimini limitler içerisinde tutmak amacıyla kullanılan senkron generatörlerdir. Son yıllarda şebekelerdeki kullanımını neredeyse kalmıştır [50]. Aşırı ikaz durumunda reaktif güç üretme, düşük ikaz durumunda reaktif güç çekme prensibiyle çalışan elektrik ekipmanlardır.

3.7 Statik Senkron Kompansatörler

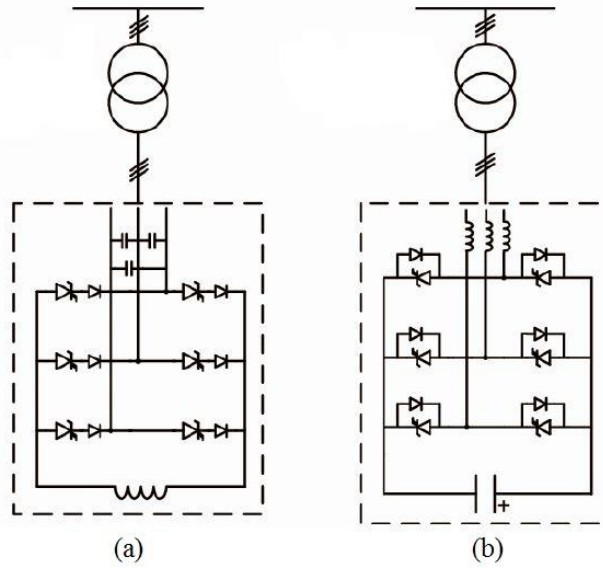
Statik senkron kompansatör literatürde şönt bağlı statik kompansatör karakteristiğinde çalışan ve kapasitif / reaktif akım çıkışını sistem geriliminden bağımsız olarak kontrol edebilen statik senkron generatör olarak tanımlanmaktadır.

STATKOM şönt bağlı bir çeşit SVC'dir (Şekil 3.4). Reaktif güç üretimi açısından, uyarım akımıyla reaktif güç çıkışı kontrol edilebilen senkron generatörlere benzemektedir. Bu benzerlik dolayısıyla isminde senkron ibaresi yer almaktadır. Senkron kompansatörler dağıtım ve iletim sisteminde önceleri sıklıkla kullanılmaktaydı. Ancak kısa devre akımına yaptıkları katkı, ilave koruma ekipmanları gerektirmesi, STATKOM'a oranla düşük tepki süreleri ve yüksek güç kaybı oranları nedeniyle günümüzde kullanım alanı azalmış durumdadır [56].



Şekil 3.4 : Reaktif güç üretimi yapan senkron kompensatör (a) ve gerilim kaynaklı (b) STATKOM devre şemaları [57].

Reaktif güç üretimini konverterler vasıtasıyla kontrol eden STATKOM'un konverter yapısı gerilim kaynaklı ve akım kaynaklı olarak iki farklı tiptedir. Şekil 3.5 bu iki farklı tipteki STATKOM'a ait devre şemalarını göstermektedir. Genelde tercih edilen tip gerilim kaynaklı olanlarıdır. İletim ve dağıtım sistemlerinde kullanılabilirler. Dağıtımda kullanılan STATKOM'ların fonksiyonu dağıtım sistemindeki güç faktörünü düzeltmek, harmonik filtre görevi yapmak, yük dengelemek olarak sıralanabilir. Şebekeye dengesiz ve harmonik distorsiyona sahip akım enjekte ederek yük akımındaki veya besleme gerilimindeki dengesizlikleri ve distorsiyonları sönmülemeyi amaçlar [58].



Şekil 3.5 : Akım kaynaklı (a) ve gerilim kaynaklı (b) STATCOM devre şemaları.

Yaygın olarak kullanımda olan gerilim kaynaklı konvertör yapıları STATKOM kondansatör içermektedir. Bu kondansatör konverter kontrolü için gerekli olan DC gerilimi sağlamaktadır. Konverter şebeke frekansında kontrol edilebilir üç faz gerilim üretmektedir. Üretilen gerilim reaktör ve STATKOM trafosu üzerinden şebekeye bağlanmaktadır. STATKOM çıkış gerilimi şebeke geriliminin üzerinde olur ise konverter şebeke için reaktif güç üretir (kapasitif mod). Eğer STATKOM çıkış gerilimi şebeke geriliminin altında kalır ise şebekeden STATKOM'a doğru bir akım akar ve konverter reaktif güç tüketir (endüktif mod).

SVC'lerle benzer bir fonksiyonlara sahip olsa da onlardan farklı bazı kullanım avantajları sağlamaktadır. SVC'lere kıyasla, arıza anında veya sistem geriliminde anormal bir düşüm meydana geldiğinde sisteme reaktif güç desteği sağlamak konusunda daha kabiliyetlidirler. Sistem gerilimi 0.2 pu değerlerine düştüğünde dahi sisteme tam kapasitede reaktif güç desteği sağlayabilirler. STATKOM tam kontrollü güç elektroniği ekipmanlarına sahip olduğu için SVC'ye oranla çok daha hızlı tepki verebilmektedir. Ayrıca reaktif güç üretimi tüketimi için konverter yapısından ve kondansatör geriliminden faydalanan STATKOM, bu amaçla büyük fiziksel boyutlara sahip kondansatör ve reaktör banklara ihtiyaç duyan SVC'lere oranla çok daha küçük boyutlarda imal edilebilmektedirler [57].

3.8 Dağıtık Üretim

Daha önceki bölümlerde ifade edildiği gibi dağıtık üretimlerin yaygınlaşmasına bağlı olarak şebekenin gerilim profilinde farklılaşmalar söz konusu olmaktadır. Yönetmeliklerde talep edilen gerilim limitlerinde kalmak adına kullanılan ekipmanlara önceki bölümlerde detaylıca değinilmiştir. Dağıtık üretime bağlı gerilim düzensizliklerini ortadan kaldırmak adına yine dağıtık üretimlerin reaktif ve aktif güç üretimlerini kontrol eden sistemler vasıtasıyla sistem gerilimine müdahale etme imkanı doğabilmektedir. Denklem 2.4'den de anlaşılacağı gibi, dağıtık üretimlerin aktif ve reaktif güç çıkışları dağıtık üretimlerin bağlandığı noktalarda gerilimin artışına veya düşümüne doğrudan etki yapabilmektedir.

Dağıtık üretim tesisleri ağırlıklı olarak rüzgar ve güneş enerjisi gibi rejimi gün içerisinde değişebilen kaynaklar kullanarak enerji üretmektedirler. Bu durum gerilim profilinde, üretim miktarlarının değişimine bağlı olarak bozulmaların meydana gelmesine, YAKD'ye sahip trafoların sıklıkla kademe değiştirmesine sebep

olabilmektedir. Dağıtık üretimlerin entegrasyonu neticesinde meydana gelen gerilim aşımalarını önlemek adına aşağıdaki yöntemlerden faydalanılmaktadır: [29]

- Dağıtık üretim tarafından sisteme reaktif güç enjekte etmek veya çekmek
- Talep Katılımı
- Dağıtık üretimin aktif güç üretimini kısıtlamak
- Gerilimi artışı önlemek için enerji depolama cihazları kullanımı

3.8.1 Reaktif güç kontrolü

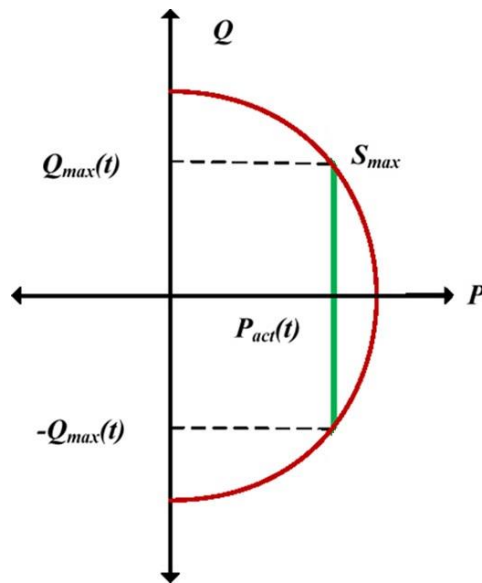
Dağıtım sistemi işletmecileri dağıtık üretimlerden belirli bir güç faktörü (örneğin ± 0.95) aralığında çalışmaları veya sabit bir güç faktöründe çalışmalarını talep edilmektedir. Bu isteğin temel sebepleri şebeke gerilimini belirli limitler arasında tutmak, dağıtık üretim entegrasyonu nedeniyle gerilim düzensizliklerine sebebiyet vermemek ve gerilim düzenleyici ekipmanların gereksiz operasyonlarının önüne geçmek olarak sıralanabilir.

Dağıtık üretimlerin iki farklı şekilde çalışması mümkündür. Bunlar sabit güç faktörü kontrolü (sabit reaktif güç kontrolü) ve gerilim kontrolü şeklindedir [7]. Bu iki çalışma şekli, şebekenin anlık değerlerine göre farklı anlarda devreye sokulabilir. Örneğin dağıtık üretimin bir rüzgar enerjisi santrali (RES) olduğunu düşünelim. Santralin bağlandığı bara gerilimi 0.89 pu değerine düşer ise (şebekenin 0.9-1.1 pu gerilim aralığına izin verdiğini varsayalım) santral, gerilim kontrollü şekilde çalıştırılarak reaktif güç üretiminin artırılması, bara geriliminin 0.90 pu'ın üzerine çıkarılması mümkün olabilir. Örnekten de anlaşılacağı üzere dağıtık üretimler ilk anda güç faktörü kontrol modunda çalıştırılmaktadırlar. Anlık olarak takip edilen şebeke geriliminde fark edilen bir aşım söz konusu olur ise işletmenin gerilim regülasyonu stratejisine bağlı olarak gerilim kontrolü moduna geçebilirler.

Senkron generatörler genellikle yüksek güçte üretim yapan merkezi santrallerde kullanılmaktadır. Dağıtık üretimde kullanılan senkron generatörlerde DC uyarım sargıları ile reaktif güç kontrolü yapılabilmektedir. Generatörün çıkış değeri ayar değerleriyle kıyaslanarak sonuçlar otomatik gerilim regülatörü (OGR) ve uyarıcıya iletilir. Senkron generatörler gerektiğinde aşırı ikaz veya düşük ikaz ile uyarılarak reaktif güç üretebilir veya tüketebilir.

Asenkron generatörler dağıtık üretimlerde yaygınca kullanılmaktadır. Asenkron generatörler reaktif güç tüketme eğilimindedirler. Bu sebeple generatör terminallerinde güç faktörünü düzeltmek için STATKOM, şönt kondansatör gibi güç faktörünü düzenleyici ekipmanlarla birlikte tesis edilmeleri gerekmektedir. Çift beslemeli asenkron generatör ÇBAG yapısı günümüzde kullanılan rüzgar türbinlerinin büyük bir bölümünde kullanılmakta olan yapıdır. Bilezikli asenkron generatörün rotor devrelerine dışarıdan bir gerilim uygulanarak makinanın değişken hızlı generatör şeklinde çalıştırılması sağlanabilir. ÇBAG yapıları rüzgar türbininin rotor tarafında yer alan konverter türbinin çıkış gerilimini, aktif/reaktif güç çıkışını kontrol edebilmektedir. Şebeke tarafında yer alan konverter kondansatörün DC gerilimini sağlamaktadır [59]. Tam kapasite ile aktif güç üreten rüzgar türbinlerinin reaktif güç kapasiteleri düşebilmektedir. Böylesi bir durumda santral reaktif güç talebi açısından şebeke yönetmeliklerine uyum sorunu yaşar ise reaktif gücü kompanze eden ekipmanlarla tesise destek olmak gerekmektedir.

Rüzgar ve güneş enerjisi gibi reaktif güç kapasitesi olan dağıtık üretimler bu karakteristiklerine inverter yapılarıyla kavuşmuşlardır. Şekil 3.6 inverterin reaktif güç kapasitesi görülebilmektedir. Aktif güç üretimlerinden bağımsız olarak reaktif güç üretebilmektedirler. Hatta bu sayede güneş enerjisi santralleri güneş ışınlarının olmadığı gece saatlerinde aktif güç üretimleri olmadan dahi şebekeye reaktif güç desteği sağlayabilirler. İnverterlerin reaktif güç kapasitelerinden faydalanmak adına santralin ihtiyacından büyük güçte inverter tesis etme yöntemine gidilebilmektedir.



Şekil 3.6 : İnverter reaktif güç kapasite eğrisi.

3.8.2 Aktif güç üretimini kısıtlamak

Finansal sebeplerden ötürü aktif güç üretiminde kısıtlamaya gitmek (yük atmak) gerilim kontrolü için tercih edilmek istenen bir yöntem değildir. Ancak çok nadir de olsa üretimde kısıtlamaya gidilebilir. Ülkemizde Elektrik Piyasası Yan Hizmetler Yönetmeliğinde [46] 66 kV ve üzeri gerilim seviyesinden ilettime bağlanan üretim tesisleri (30MW üzeri) ile reaktif güç kontrolü hizmet anlaşması imzalanır. Bu anlaşma gereği yönetmelikte yük atma ile ilgili talimat şu şekildedir:

Reaktif güç kontrolü hizmetine ilişkin TEİAŞ ile yan hizmet anlaşması bulunan üretim tesislerinde ünitelerin nominal aktif güçlerinin, aşırı ikazlı olarak 0.85, düşük ikazlı olarak da 0.95 güç faktörlerine karşılık gelen reaktif güç değerlerinde çıkış vermesini sağlayan kapasitenin üzerindeki reaktif güç kapasitesi sağlaması gerekli olması halinde söz konusu üretim tesislerine öncelikle 44 üncü madde uyarınca yük atma talimatı verilir [46].

Yine aynı yönetmeliğin 39.maddesi 34.5 kV ve altı gerilim seviyesinden bağlı üretim tesisleri lisans sahibi tüzel kişilerin ilgili dağıtım şirketi ile reaktif güç kontrolü için hizmet anlaşması imzalamasını zorunlu kılmıştır. Yük atma talimatı Milli Yük Tevzi Merkezi (MYTM) tarafından Yan Hizmet Piyasa Yönetim Sistemi (YHPYS) isimli internet tabanlı bir uygulama ile üreticilere bildirilir.

İnverter yapıları dağıtık üretim tesisleri inverter kontrolleri ile aktif güç üretiminde sınırlama yapabilirler. Rüzgar santrallerinde bu kısıtlama pitch (yunuslama) ve yaw (sapma) kontrolüyle de yapılabilmektedir. Yine fotovoltaik, kombine çevrim, hidroelektrik gibi dağıtık üretim tesislerinin üretimleri de çeşitli kontrol yöntemleriyle kısıtlanabilir.

Aktif güç üretimini sınırlayarak gerilimi düzenlemek adına geliştirilmiş dört adet stratejiden bahsedebiliriz [60]:

- **Aşırı gerilim anında generatörü sistemden ayırmak:** Generatörü tamamen sistemden ayırmayı öneren bir yöntemdir. Santrali tümüyle sistemden ayırmak gerilimin düşmesine direkt olarak etki etmektedir. Gelişmiş teknoloji ve ilave ekipmanlara gereksinim duyulmaz.
- **Sabitlenmiş üretim kesintisi:** Belirlenen aktif güç değeri aşıldığında üretimin sınırlandırılması prensibine dayanır. Hidroelektrik ve rüzgar santrallerine uygulanabilmektedir.

- **Aktif güç / Gerilim düşümü kontrolü:** Belirlenen kritik aşırı gerilim değerine yaklaşıldığında aktif güç üretimini kısıtlayan fonksiyon devreye girer. Gerilimi limitler dahilinde tutmak için üretimde kısıtlama yapılır.
- **Üretim kapasitesinin belirli bir oranında üretim:** Mevsimsel olarak üretimin yüksek olduğu dönemlerde uygulanan bir yöntemdir. Üretimi belirli bir yüzde ile devamlı olarak kısıtlamak şeklinde uygulanır. Sürekli olarak bir kesinti söz konusu olduğundan en çok üretim kaybının olduğu yöntem bu yöntemdir.

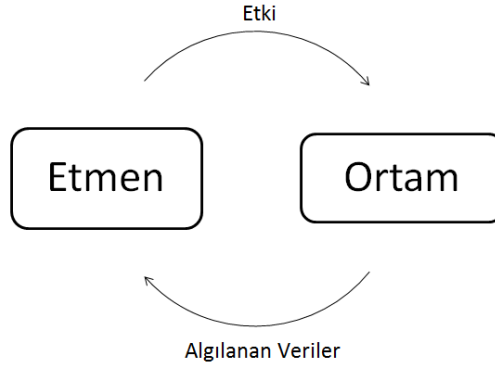


4. ÇOK ETMENLİ SİSTEM İLE GERİLİM KONTROLÜ

4.1 Etmenin Tanımı ve Özellikleri

Etmenin uluslar arası geçerliği olan kesin bir tanımı mevcut değildir. Bu sebeple farklı araştırmacılar farklı açılardan etmen tanımı yapmışlardır. Bunlardan en sade ve geçerli olanlarından biri Russel ve Norving'in [61] yaptığı tanımdır. Etmen için algılayıcıları vasıtasıyla çevresini algılayan ve etkileyicileri vasıtasıyla çevresine etki eden oluşum tanımını yapmışlardır. Bu yapı Şekil 4.1'den görülebilir. Ancak en güncel ve kapsamlı tanım [62]'te yapılan tanım olduğunu söyleyebiliriz. Bu tanımda yer alan bazı kavramların bu başlık altında detaylandırılma ihtiyacı doğmaktadır. [62] etmeni şu şekilde tanımlamıştır:

Bazı ortamlarda çevresindeki değişime tepki gösterebilen (reactivity), eğilimler tarafından yönlendirilebilen (pro-activeness) ve diğer etmenler ile iletişim kurabilen (social ability) bir yazılım ya da donanım ögesidir. İki veya daha fazla etmen içeren sistemler ise çok etmenli sistemlerdir.



Şekil 4.1 : Etmen ve ortam arasındaki etkileşimin temel gösterimi.

Etmen bazlı sistemler 1990'lı yıllardan itibaren özellikle bilgisayar alanında üzerinde araştırılma yapılan en ilgi çekici alanlardan biri olmuştur. Yazılım sistemlerinin dizayn edilmesi ve iyileştirilmesi amacıyla kullanımı yaygınlaşmıştır. Yazılım mühendisliği, programlama, bilgisayar etkileşimi, kontrol sistemleri, karar verme ve veri elde etme gibi bilgisayar bilimleri alanında kullanım alanı gitgide

genişlemektedir. Bu kullanımlara ek olarak elektrik mühendisliğinde de kendisine kullanım alanları bulmaktadır. Elektrik mühendisliğindeki kullanım alanları için iyileştirme çalışmaları da devam etmektedir. Güç sistemlerindeki kullanım alanları görüntüleme, dağıtık kontrol, modelleme ve simülasyon, koruma olarak sıralanabilir [63].

Etmenlerin yapısal özellikleri temel olarak iki ana başlıkta toplanmaktadır. Bunlar "birincil" ve "ikincil" özelliklerdir. Birincil özellikler kapsamında yer alan özellikler her etmende bulunmalıdır. Bir yazılımsal veya donanımsal sistemin etmen olabilmesi için birincil özellikleri ihtiva etmesi gerekmektedir. Bu özellikler etmeni standart yazılım ve donanım sisteminden ayırması sebebiyle önem arz etmektedir. İkincil özellikler ise etmeni daha gelişmiş bir yapıya büründüren ve tasarlanan etmen yapısına göre gerekli olan kabiliyetleri kazandıran özelliklerdir. Bu özelliklerin her etmende bulunma şartı yoktur. Birincil özellikler ve detayları aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

- **Özerklik (autonomy):**

Bir etmene dışarıdan insan, diğer etmenler veya bir sistemin direkt olarak müdahalesi olmadan görev başlatabilme ve çalışabilme kabiliyeti olarak belirtilmektedir. Bir etmenin özerk olması kendi etkilerini kontrol edebilmesi anlamına gelmektedir. Özerklik belirli sınırlar içersinde geçerlidir. Etmen sınırsız bir özerkliğe sahip değildir. Kullanıcılar etmenlerin özerklik sınırlarına müdahale edebilmelidirler. Etmenler gerektiği taktirde kullanıcılarının taleplerini değerlendirir ve çalışma şekillerini bu yönde düzenleyebilirler [64]. Örneğin bir hat üzerinden geçen akımını sürekli olarak denetleyen ve belirtilen eşik değerinin üzerine çıktığında kesiciyi açtıran bir aşırı akım koruma rölesi özerk çalışan donanımsal bir etmendir.

- **Karşıtlık (reactivity):**

Etmen içinde bulunduğu ortamı sürekli olarak algılamalıdır. Ortamdaki değişikliklere bağlı olarak yetenekleri ve amaçları doğrultusunda çerçevesine gerekli tepkiyi göstermelidir. Çevresine göstereceği tepki bir başka etmeni uyarmak da olabilir. Etmenin algılaması beklenen ortam yani etmenin de dahil olduğu ortam, fiziksel algılayıcılar (sensörler) ile algılanılan fiziksel bir ortam, birden çok etmenin yer aldığı bir sistem veya internet olabilir. Örneğin internet ortamında yer alan bir etmen belirli bir konuda veri sunan bir

sunucuyu izlerken o sunucunun sunduğu verilerde bir değişiklik meydana gelirse bunu fark etmelidir. Bu değişiklik karşısında bilgisi ve becerisi dahilinde göstermesi gereken bir tepki varsa bunu değerlendirmeli, aktarması gereken bilgileri diğer etmenlere aktarmalıdır [64].

- **Amaç yönelimlilik (pro-activeness):**

Amaç yönelimlilik etmenin kendi kabiliyetleri çerçevesinde planlama yaparak amaçlarını gerçekleştirmek için eylemde bulunmasıdır. Bir etmenin eylemini gerçekleştirebilmesi için gerekli olan ön koşulların da sağlanmış olması gerekir. [63] ise amaç yönelimlilik özelliğini bir etmenin amaçlarını oluşturabilmesi için gerektiğinde davranışlarını dinamik olarak değiştirebilmesi olarak tanımlar. Örnek olarak da, eğer bir etmen çok etmenli bir ortamda amacını gerçekleştirebilmek iletişim kurması gereken bir etmenle olan iletişimini kaybederse, amacına ulaşabilmek için benzer şekilde çalışan bir başka etmen araması gerektiğini söylemiştir.

- **Sosyal yetenek (social ability):**

Bir etmenin amacına ulaşabilmek için diğer etmenlerle veya kullanıcılarla iletişime geçebilmesi kabiliyetidir. Etmenler eylemlerini gerçekleştirebilmek adına birbirleri ile müzakere ve işbirliği ederler. Etmenler birbirleri ile etmenler arası bir haberleşme dili ile iletişim kurmaktadır. FIPA (Foundation for Intelligent Physical Agents) tarafından önerilen, etmenlerin birbirleriyle mesajlaşması ve bilgi alışverişinde bulunması için geliştirilmiş olan etmen haberleşme dili ACL (Agent Communication Language) bu sebeple geliştirilmiştir.

- **Kalıcı süreklilik (temporal continuity):**

Kalıcı süreklilik özelliği, etmenlerin kendilerinden beklenen görevi gerçekleştirdikten sonra dahi hazır olarak beklemelerini, ortamda meydana gelebilecek değişiklikleri her an gözlemelerini gerektirir [65].

Daha önce de söylendiği gibi bir etmenin yukarıda belirtilen birincil özelliklere sahip olması beklenir. Ancak aşağıda detaylarından bahsedilecek olan ikincil özellikleri mutlaka taşıyacaktır diye bir zorunluluk bulunmamaktadır. Çünkü ikincil özellikler, tasarlanan sistemin yapısına bağlı olarak etmenin gerçekleştirmesi beklenen eylemlerin mahiyetine göre etmenin özelleşmesini sağlar. İkincil özellikler ve detaylarından bahsetmek gerekirse [64,65]:

- **Gezicilik (Mobility):**

Etmen ağ ortamında yer alıyorsa ve konumunu bir yerden başka bir yere taşıma kabiliyetine sahipse o etmene gezici etmen adı verilir. Örneğin bir etmeden işlemini daha güçlü donanımlara sahip bir bilgisayarda gerçekleştirdikten sonra eski konumuna dönmesi bekleniyorsa o etmende gezicilik özelliği mevcut olmalıdır.

- **Öğrenme (Learning):**

Etmenin kullanıcı eğilimleri doğrultusunda geri bildirimler sağlayarak daha efektif çalışabilmek adına eylemlerini değiştirebilme yeteneğidir.

- **Akılcılık (Rationality):**

Etmenin eylemini gerçekleştirebilmesi için planlama yapması, performansını maksimum seviyeye çıkarmak için en doğru yolu izlemesi.

- **Olumluluk (Benevolence):**

Etmenin kabiliyetleri çerçevesinde gerçekleştirebileceği tüm eylemleri amacına ters düşmediği takdirde gerçekleştirmek için çalışmasıdır.

4.2 Çok Etmenli Sistem

Genel anlamda iki veya daha çok etmenin bir araya gelerek oluşturduğu yapıya çok etmenli sistem denilmektedir. Ancak etmende olduğu gibi çok etmenli sistem teriminde de farklı açılardan yaklaşılmış tanımlar mevcuttur. Yukarıda bahsedildiği üzere etmenlerin birbirleriyle etkileşim kurabilme yetenekleri (sosyallik) etmenlerin birincil özelliklerinden biridir. Etmenler arasındaki bu etkileşime dayanan tanım [15] tarafından yapılmıştır. ÇES'i, birbirleriyle iletişim kuran birden çok etmenin bir araya gelerek oluşturdukları sistem olarak tanımlanmıştır. Etmenler bireysel bilgi ve kabiliyetlerinin yeterli olmadığı problemleri bir araya gelerek çözebilirler. Bu konuda yapılmış güncel tanımlarından biri [29] tarafından yapılmıştır. ÇES, etmenlerin bireysel hedeflerini gerçekleştirebilmeleri amacıyla birbirleri ile uygun bir haberleşme kanalıyla etkileşime geçtikleri, belirli bir çevre ile sınırlandırılmış, çeşitli etmenlerden oluşan bir sistemdir. Çok etmenli sistemlerin güç sistemleri uygulamalarında kullanılmalarının avantaj sağlayan tarafları aşağıdaki şekilde sıralanabilir [63]:

- **Esneklik (flexibility):**
Değişken durumlar karşısında doğru karşılıkları verme kabiliyeti vardır. ÇES bir etmeni devre dışı bırakabilir. Diğer etmenler çalışırken yeni bir etmeni devreye sokabilir.
- **Genişletilebilirlik (extensibility):**
Mevcut bir sisteme yeni bir işlev eklemeyi, iyileştirmeler yapmayı mümkün kılar. Sistemin fonksiyonlarında bir değişiklik yapmadan sisteme yeni yetenekler kazandırma imkanı tanır.
- **Dağıtım (distribution):**
Etmelerin aynı yeteneklerle ve aynı amaçları gerçekleştirmek adına farklı ortamlara aktarılabilmesine imkan tanır.
- **Açık mimari (open architecture):**
Açık mimari yapısı sistem haberleşmesi açısından belirli bir haberleşme diline bağlı kalmamasına olanak sağlar. Agentlar arası haberleşmede farklı haberleşme kanallarının kullanılabilir olması sisteme aynı zamanda esneklik de kazandırır.
- **Hata toleransı (fault tolerance):**
Sisteme yedekli çalışma kabiliyetini kazandırır ve sistemin hataları tolere etmesini sağlar. Eğer bir etmen amaçlarını gerçekleştirmek için ikinci bir etmene ihtiyaç duyuyorsa ve bu etmen hata vermiş ise, ilk etmen amacını gerçekleştirmek için alternatif bir etmen aramaya başlar.

4.3 Çok Etmenli Sistemlerin Uygulama Alanları

ÇES elektrik mühendisliği alanında yenilikçi çözümler getirmektedir. Güç sistemlerinde ÇES'ten görüntüleme ve teşhis, koruma, modelleme ve simülasyon, dağıtık kontrol gibi dört farklı alanda faydalanılmaktadır.

İzleme ve arıza tespitini, çok etmenli sistemden faydalanarak gerçekleştirmek için araştırmalar yapılmıştır. Etmenin en önemli özelliklerinden birisi; ortamı izlemesi ve gözlemlere dayanarak hata tespiti yapabilme yeteneğidir. Bu özellik, elektrik şebekelerindeki ekipmanların durumlarının izlenmesinde ve şebekedeki hataların tespitinde/tanımlanmasında kullanılabilir. İlk olarak veriler toplanır ve yorumlanır. İşlenen veriler hata tespitinde ve arızalı girişlerin değiştirilmesiyle sistemi kararlı hale getirmede kullanılır.

Koruma, elektrik mühendisliğinde çok etmen sistemlerin en az tesir ettiği alanlardan birisidir. Yine de, etmenlerin ve koruma ekipmanlarının beraber çalışabileceği çalışmalar yürütülmektedir. Bu çalışmalar, hata toleransını ve şebekelerin kendi kendilerini onarma yeteneklerini hızlandıracaktır [29].

Modelleme ve simülasyon, esas olarak yazılım teknolojileri ve karmaşık sistem görevleri ile ilişkilidir. Modern şebekelerde geleneksel sistemleri kullanarak modelleme yapmak çok karmaşık bir hal alabilmektedir. Çok etmenli sistemler kullanılarak karmaşık şebekeler, geniş şebeke ağları, enerji piyasaları ve enerji kullanımı konularında modelleme ve simülasyon yapmak kolaylaşır [63].

Çok etmenli sistemler modern şebekeleri esnek bir şekilde kontrol etmeye olanak vermektedir. Dağıtım sistemlerinde çok etmenli sistem kullanılarak dağıtık kontrol sağlamak hızla yaygınlaşmaktadır. Dağıtık üretimlerin sayıca artması ve enerji piyasasının serbestleşmesi; aktif ve reaktif güç kontrolünde ve şebeke değişimlerinde, lokal, etkin çalışan, dağıtık karar verme mekanizmalarına olan ihtiyacı gündeme getirmiştir. Lokal karar verme mekanizmalarına ait etmenlerin, lokal durumları görüntüleme, şalt sahalarını ve santralleri kontrol edebilme, şebekelerin diğer bölümleriyle koordineli çalışabilme gibi yeteneklere sahip olması gerekmektedir.

4.4 Çok Etmenli Sistem Yapıları

Etmenlerin farklı davranış ve haberleşme yapıları olduğu için bu kapsamda birbirlerinden ayrılan, temelde üç farklı organizasyona sahip çok etmenli sistem yapısından söz edebiliriz [29].

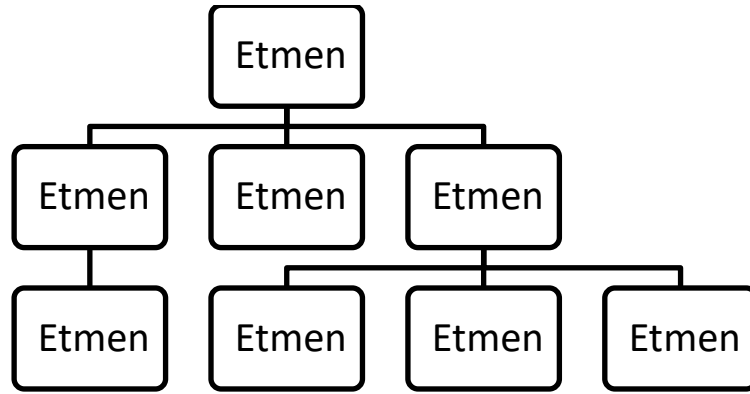
- Hiyerarşik
- Düz
- Modüler

4.4.1 Hiyerarşik çok etmenli sistem

Hiyerarşik yapıda etmenler arası haberleşme kesin çizgilerle sınırlandırılmıştır. Sistem alt ve üst kademelere bölünmüştür (Şekil 4.2). Bu yapı dolayısıyla etmenler birbirlerine bağımlı hale gelmektedir. Üst yapıda yer alan etmenler kısmen veya tamamen alt kademedeki etmenlere hükmederler. Hiyerarşinin gereği olarak alt

kademede yer alan etmenlerin görevlerini yerine getirmeleri, üst kademedekilerin amaçlarına ulaşmaları için ön koşul oluşturur. Bu hiyerarşik yapı sistemi, dağıtık kontrollerden çok merkezi kontrol sistemlerinde kullanıma uygundur.

Literatürde hiyerarşik yapıdan faydalanılan çalışmalar mevcuttur. [19] dağıtık üretimlerin reaktif güç çıkışlarını kontrol eden algoritma ile gerilimi düzenleme yoluna gitmiştir. Hiyerarşik yapının alt kademesinde kontrol röle etmenlerine üst kademede hat röle etmenlerine görev verilmiştir. [20] çalışmasında dağıtım trafolarını gerilimi düzenlemek adına birincil etmen olarak görevlendirmiştir. Dağıtım trafosu etmeni gerilimi düzenleyemediği takdirde aktif güç üretimlerini kısıtlama yoluna gitmiştir. Birden çok alt kademe etmeni ve üst kademe etmeni kullanılarak dağıtım sisteminde dağıtık kontrolü hedeflemiş çalışmalar da mevcuttur [21,66]. [66] YAKD'nin asgari düzeyde kademe değiştirmesini sağlayarak ekonomik girdi hedefleyen hiyerarşik yapıya sahip bir çalışma sunmuştur. [21] fotovoltaik sistemlerin sebep olduğu gerilim dalgalanmalarını geliştirdiği çok etmenli sisteme dayanan kademe kontrol algoritmasıyla aşmayı hedeflemiştir. Lokal ve yönetici olmak üzere iki çeşit etmenden faydalanmıştır. [67] hiyerarşik çok etmenli yapıdan faydalanarak her barada tanımlanmış alan bara etmenleri ile YAKD'nin hiyerarşik çalışması gerilim kontrolü sağlanmıştır.

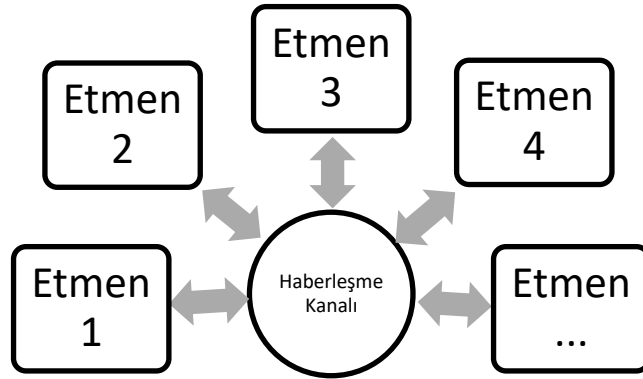


Şekil 4.2 : Alt ve üst kademelerin yer aldığı hiyerarşik yapıya sahip çok etmenli sistem şeması etmen ve ortam arasındaki etkileşimin temel gösterimi [29].

4.4.2 Düz çok etmenli sistem

Hiyerarşik yapının tersine, düz ÇES yapısı kontrol kısıtlaması içermez. Herhangi bir etmen direkt olarak diğer etmenlerle iletişime geçebilir (Şekil 4.3). Bu sayede görevlerini yerine getirmek adına kontrol eylemlerini dinamik olarak değiştirebilir. Bu özellikleri dolayısıyla dağıtık kontrol uygulamaları için çok uygun bir sistem

olarak öne çıkmaktadır. Düz ÇES yapısı bütün etmenlerden bilgilerin toplanmasını gerektirse dahi sistemin sağlamlığı ve dışa açıklığı konusunda bir handikap yaratmaz.



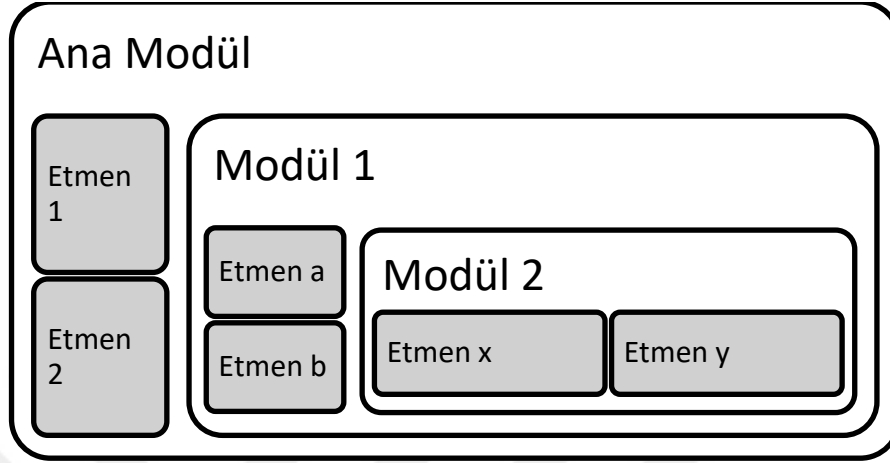
Şekil 4.3 : Her bir etmenin birbiriyle iletişim kurabildiği düz (demokratik) yapıya sahip çok etmenli sistem şeması [29].

[22] numaralı çalışmadaki yapıyı kısmi merkezi bir yapı olarak değerlendirebiliriz. YAKD, dağıtık üretim ve yük etmenlerini kullanarak gerilim regülasyonu yapan bir sistem tasarlanmış ve bunu yaparken bulanık ÇES tabanlı bir kontrol uygulamıştır. Yük etmenleri sadece gerilim görüntüleme elemanı olarak kullanılmış, YAKD ve dağıtık üretim etmenleri kontrol elemanı olarak belirlenmiştir. [68] numaralı çalışmada uygulama ve koordinasyon etmenleri kullanılmış, ÇES prensiplerine dayanarak gerilim kontrolü amaçlanmıştır. [24] referans numaralı çalışmada ise her bir dağıtık üretim noktasında yer alan etmenler ile radyal dağıtım şebekesinde gerilim kontrolü dağıtık üretimlerin koordinasyonu ile sağlanmaya çalışılmıştır. Bir etmenin kendi barasındaki bir gerilim aşımını mevcut dağıtık üretimin yardımıyla düzenleyemediği durumda, kompanzasyon etmeni arabulucu gibi davranır ve diğer dağıtık üretim etmenlerinden gerilim desteği için çağrıda bulunur. [25] referans numaralı çalışmada önerilen yöntem, bir önceki yöntemlerde gerektiği gibi iterasyona gerek duymaz. Bara etmenleri, ilgili oldukları barayı gözler ve uyumsuzlukları servis etmenlerinin arabulucu görevi üstlenmesinin yardımıyla ortadan kaldırırlar. Gerilimi düzenlemek için STATKOM cihazlarından faydalanılmıştır. Ayrıca bu çalışmada çok etmenli sistem tasarımı ve etmenler arası iletişimde kolaylık sağlayan altyapıya sahip olan JADE platformu kullanılmıştır.

4.4.3 Modüler çok etmenli sistem

Adından da anlaşılacağı üzere bu yapı birden çok modülden meydana gelir. Bu modüllerin her biri bağımsız bir ÇES olarak değerlendirilebilir. Modüler ÇES yapısı

esneklik ve özerklik özellikleri bakımından düz ÇES yapısı ile benzer seviyededir. Dağıtım sistemlerinde, dağıtım trafolarının yük altında kademe değiştiricilerine dayalı gerilim kontrol bölgeleri, modüle örnek olarak gösterilebilir. Modüler ÇES yapısı Şekil 4.4'de şematize edilmiştir [29].



Şekil 4.4 : Modüler ÇES yapısı [29].

Modüler ÇES yapısından faydalanılarak elektrik mühendisliği alanında [26-28] çalışmaları yapılmıştır. [26] çalışmasında şebeke lokal bölgelere ayrılmıştır. Bu bölgelerde yer alan etmenler sistemi dengeli çalıştırmak amacıyla koordineli bir şekilde çalışmakta ve dağıtık bir kontrol sağlamaktadır. Dengeyi kurmak adına generatörlere farklı gerilim kontrolü referans değerleri uygulanmış ve son çare olarak da yük atmaya başvurulmuştur. [27] dağıtık üretime sahip şebekeyi lokal kontrol edilebilir bölgelere bölmüştür. Bu bölgeler elektriksel mesafe konseptinden faydalanarak oluşturulmuş gerilim bölgeleridirler. Modüler çoklu etmen sisteminin hücre tabanlı yaklaşımına [28] numaralı referansta değinilmiştir. Bu çalışmada aktif şebekede ÇES ile gerilim kontrolü yapılmıştır. Lokal kontrol yeteneklerine sahip, hücre olarak nitelendirilen hatların kontrol seçenekleri kıyaslanarak YAKD'nin optimal kademesini belirlemeyi amaçlamıştır. Eğer YAKD ile gerilim regülasyonu sağlanamaz ise hücre tabanlı gerilim kontrolüne başvurur. Hücreler sadece dağıtık üretimleri kontrol etmekle yetinmez talep yükü de düzenleme yetenekleri vardır.



5. UYGULAMA

Dağıtık üretimlerin entegre olduğu elektrik şebekelerinde meydana gelebilecek sorunlardan daha önceki bölümlerde bahsedilmişti. Bu bölümde, önceki bölümlerde bahsedilen sorunların en önemlilerinden biri olan gerilim düzensizliğinin çözümüne yönelik yapılan çalışmadan bahsedilecektir. Gerilim regülasyonu için Simulink ortamında bir test sistemi modellenmiştir. Test sisteminde kararlı hal gerilimlerinin limitler dışına çıktığı durumlar çok etmenli sistem ile düzenlenmiştir. Farklı görev tanımlarına sahip etmenler gerilim aşımını algıladığı taktirde o noktadaki gerilimi düzenleme adına birbirleriyle iletişim kurarak sorunu çözmeye çalışırlar. ÇES mimarilerinden ise hiyerarşik ÇES yapısı tercih edilmiştir.

5.1 Tercih Edilen ÇES Algoritması

Dağıtık üretimlerin üretim değerlerinde veya şebekedeki yük miktarında meydana gelebilecek değişimler, sistemin gerilim seviyesinin yerel yönetmelikler ve uluslararası standartlarda belirtilen limitlerin dışına çıkmasına sebep olabilmektedir. Sistemin farklı noktalarında yer alan etmenler şebekenin esnekliğini ve dağıtık kontrol kabiliyetini artırmaktadır. Bu bölümde önerilecek olan kontrol algoritması sistemin farklı bölgelerindeki gerilim değerini sürekli olarak sorgulamaktadır. Etmenler arası iletişim kabiliyetlerinden faydalanarak ilgili etmenlerden gelen etkilerle gerilimi izin verilim limitlerin içinde tutmaya çalışmaktadır. Düzenlenen çok etmenli sistem yapısı üç çeşit etmen içermektedir bunlar:

- Yük etmeni
- Reaktif güç kontrol etmenleri
- YAKD etmeni

Önerilen ÇES'de yer alan etmenler gerilimi düzenlemek adına belirli bir sıra ile görevlerini gerçekleştirirler. Sistemde yer alan YAKD etmeninin temelde iki ana görevi vardır. Bunlardan birincisi gerilim aşımı olan baranın gerilimini düzenlemek için trafonun kademesini değiştirmek. Bunu yaparken aşım olan baradaki gerilim

değeri ile gerilim limitlerini kıyaslar. Trafoda fiziksel olarak mevcut olan kademe sayısını aşma imkanı yoktur. YAKD etmeninin ikinci görevi ise kademe değişimini en az sayıda tutmaktır. Gereksiz kademe değişimleri, daha önce de bahsedildiği gibi kademe değiştiricinin bakım masraflarını artıracaktır.

YAKD etmeni en son başvurulacak olan etmendir. YAKD etmeninin müdahalesine gerek kalmadan önce dağıtık üretim etmeni, şönt kondansatör etmeni gibi sistemde yer alan reaktif güç kontrol etmenleri gerilimi düzenlemeye çalışır. Bu etmenlerin etkilerinden sonra sistem gerilimi hala limitlerin dışında ise YAKD etmeninden yardım istenir.

Reaktif güç kontrol etmeni olarak sisteme reaktif güç enjekte eden veya sistemden reaktif güç çekebilen cihazlar kast edilmektedir. Daha önceki bölümlerde modern dağıtım şebekelerinde kullanılan reaktif güç kapasitesine sahip şönt reaktör, şönt kondansatör, SVC, STATKOM vs. gibi ekipmanlardan bahsedilmişti. Bu cihazlara ilaveten interver yapısına sahip rüzgar türbinleri gibi reaktif güç kontrolü yapabilen dağıtık üretimlerin varlığından da bahsedilmişti. Önerilen ÇES algoritması ve simülasyonu yapılan sistemde şönt kondansatör ve ÇBAG yapısına sahip rüzgar türbinleri mevcuttur.

Reaktif güç kontrol etmenlerinin temel görevi talep edildiği taktirde sistemdeki gerilimi düzenlemek adına sisteme etkide bulunmaktır. Uygulamada bu etki, dağıtık üretimler yani rüzgar türbinleri için reaktif güç kontrolü modundan gerilim kontrolü moduna geçmektir. Bu sayede gerilimi, belirtilen ayar değerlerinin içerisinde tutmak adına rüzgar türbininin reaktif güç kapasitesi dahilinde sisteme reaktif güç desteği sağlanabilir veya sistemden reaktif güç çekilebilir. Uygulamada kullanılan bir diğer reaktif güç kontrol ekipmanı ise şönt kondansatördür. Reaktif güç kontrol etmeni olarak rüzgar türbininden önce tercih edilen bir etmendir. Pratikte optimal kontrol sağlamak adına genelde kademeli olanları tercih edilmektedir. Bu sayede gerektiği miktarda kondansatör gurubu devreye alınarak reaktif güç desteği sağlanmaktadır. Ancak bu tezde yapılan uygulamada sabit değerli bir şönt kondansatör mevcuttur. Talep gelmesi halinde sisteme girer veya devreden çıkar.

Yük etmenleri bu çalışmada bir çok çalışmada olduğu gibi pasif etmenler olarak kullanılmıştır. Yük etmeninin temel görevi bara gerilimini simülasyonun her örnekleme zaman aralığında görüntülemektir. Bara gerilimini tanımlanan limitlerle

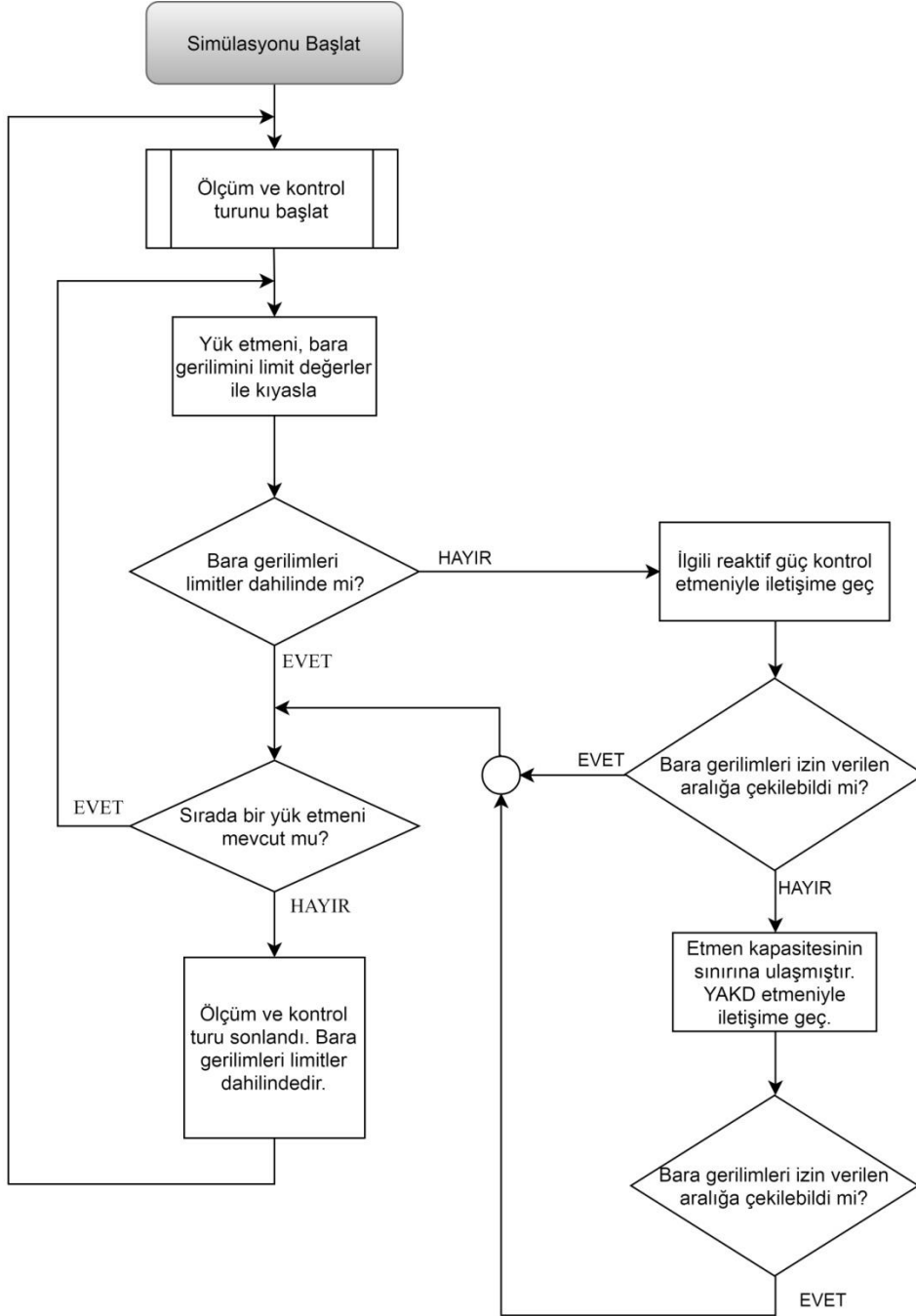
kıyaslar. Aşım meydana geldiği taktirde ilk etapta ilgili reaktif güç kontrol etmeni ile iletişime geçer. Gerilim düzenlendiği taktirde veya gerilimde bir aşım meydana gelmemişse bir sonraki yük etmenini aktifleştirir.

Uygulamada bir dağıtım şebekesi modellenmiştir. Modelde YAKD'ye sahip bir transformatör, yükler, dağıtık üretimler ve şönt kondansatör yer almaktadır. Yukarıda da bahsedildiği üzere üç farklı etmen çeşidinden faydalanılmıştır. Şekil 5.1'de akış diyagramı verilen etmenler arası koordinasyon ve karar verme mekanizmasının adımları aşağıdaki gibi sıralanır:

1. Yük etmenleri simülasyonun her zaman aralığında ilgili oldukları bara gerilimini sürekli olarak izlerler.
2. Yük etmenleri sırası ile aktifleştirilerek gerilim seviyesinde bir aşım olup olmadığını kontrol ederler. Algoritmanın döngüsüne kontrol turu ismini verebiliriz. Eğer bir yük etmeni aşım tespit ederse kontrol turu o etmen üzerinde durdurulur ve yük etmeni üzerinde tanımlı olan ilgili reaktif güç kontrol etmenini bilgilendirilir.
3. Yük etmeni eğer gerilimin yükseltilmesini talep eder ve yük etmeninin etki alanında bir kondansatör mevcut ise ilk etapta kondansatör etmeni aktifleştirilir. Kondansatör etmeninin etkisinden sonra, kondansatör etmeni bara gerilimini ayar değerleri ile kıyaslar. Bara gerilimi düzenlenmiş ise kontrol turu bir sonraki yük etmenine devredilir.
4. Kondansatör etmeninin etkisinden sonra gerilim düzenlenemez ise yük etmeni ilgili bölgedeki rüzgar türbininin gerilim kontrolü moduna geçmesini talep eder. Dağıtık üretim gerilimi kapasitesi dahilinde etkide bulunarak düzenlemeyi başarabilir ise kontrol turunu bir sonraki yük etmenine aktarır.
5. Yük etmeni gerilimin limitlerin üzerinde olduğunu saptar ise direkt olarak reaktif güç kontrol etmeni olarak rüzgar türbini ile iletişime geçer. Türbinin şebekeden reaktif güç çekerek gerilimi düşürmesi beklenir. Dağıtık üretim gerilimi düzenler ise kontrol turunu bir sonraki yük etmeninden devam ettirir.
6. Bir reaktif güç kontrol etmeni etki göstermiş, bu etmen kapasitesindeki limitlere ulaşmış ancak gerilim yine de limitlerin dışında ise YAKD etmeni etkinleştirilir.
7. Eğer YAKD'ye ilgili bölgedeki reaktif güç kontrol etmeni tarafından gerilim düzenleme talebi gelir ise YAKD ilgili noktadaki gerilim bilgisini yük etmeni

üzerinden alır. Bu değeri üzerine tanımlı olan limit değerleri ile kıyaslar. Minimum sayıda kademe değişimi yaparak bara gerilimini düzenlemeye çalışır. Gerilim limitler içerisine çekilebilir ise bir sonraki yük etmeni etkinleştirilerek kontrol turu devam eder.

8. Kontrol turu tüm etmenleri sırası ile dolaşır ve herhangi bir aşım gözlemlenmez ise ilk yük etmenine geri dönerek kontrol turunu yeniden başlatır.



Şekil 5.1 : ÇES tabanlı gerilim kontrol algoritması akış diyagramı [29].

5.2 Şebeke Modeli

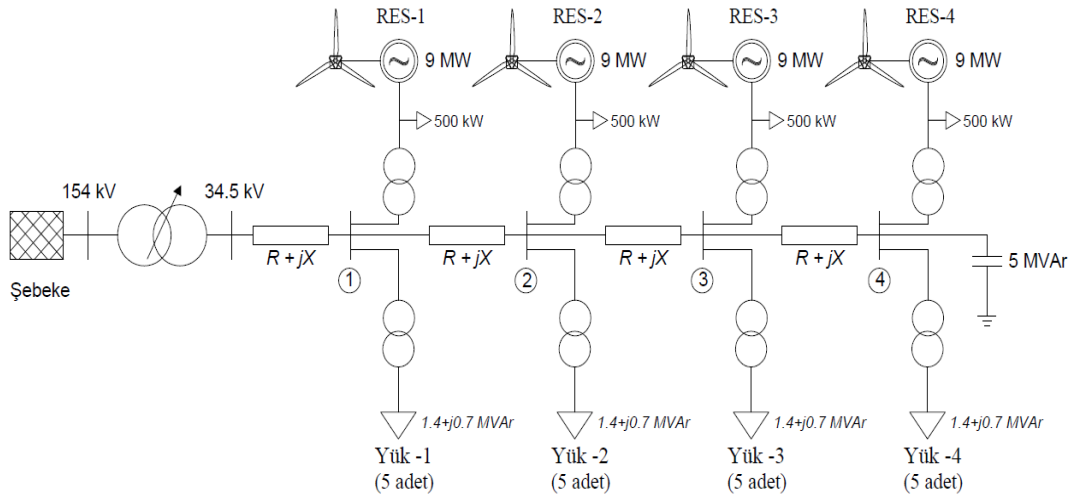
Dağıtım şebekesinde ÇES tabanlı bir gerilim kontrolü uygulaması gerçekleştirmek adına [69] çalışmasında kullanılan 6 baralı test sistemi Türkiye'de kullanılan gerilim seviyelerine uyarlanmış, bazı ilaveler ve detaylandırma çalışmaları yapılmıştır (Şekil 5.2). Sistem Simulink ortamında modellenmiştir (Şekil 5.3). Şebeke modelini 154/34.5 kV transformatörden itibaren radyal orta gerilim hattı olarak özetleyebiliriz. Sistemde ÇBAG yapılı türbinlere sahip 4 adet rüzgar santrali mevcuttur. Santrallerin dağıtım şebekesine bağlandığı noktalara yükler bağlanmıştır. Yükler alt sistem olarak detaylı modellenmiş, herbir alt sistemin içerisine 1600 kVA trafolar ile beşer adet yük bağlanmıştır. Gerilim düzenleyici ekipman olarak dağıtık üretim tesislerine ilave olarak, YAKD ve şönt kondansatör mevcuttur. Şebeke ekipmanlarına ait detaylı parametreler aşağıda belirtilmiştir:

- **Şebeke bloğu :**
 - Faz-Faz Gerilimi : 154 kV, X/R: 10, 3 faz kısa devre gücü: 1760 MVA
- **Transformatörler:**
 - 1 adet 154/34.5 kV, 100 MVA, Yd11, $12x\pm\%1.25$ YAKD
 - Yüklerin şebeke bağlantılarında 20 adet 1.6 MVA, 34.5/0.4 kV, Dyn
 - Rüzgar santrallerinin şebekeye bağlantısında 4 adet 12 MVA, 34.5/0.575 kV, Dyn
- **Rüzgar Enerjisi Santralleri:**
 - 4 adet, 9 MW kurulu gücünde, ÇBAG yapılı
- **Şönt Kondansatör:**
 - 34.5 kV, 5 MVAr
- **Yükler:**
 - 20 adet 0.4 kV, $1.4+j0.7$ MVA
 - Santrallerin iç ihtiyacı için herbir santrale 500 kW yük
- **Hatlar:**
 - Muhtelif uzunlukta, pi eşdeğer devre modeline sahip 1272 MCM iletken ve santrallerim şebeke bağlantılarında 95 mm² bakır iletkenli XLPE kablo kullanılmıştır.

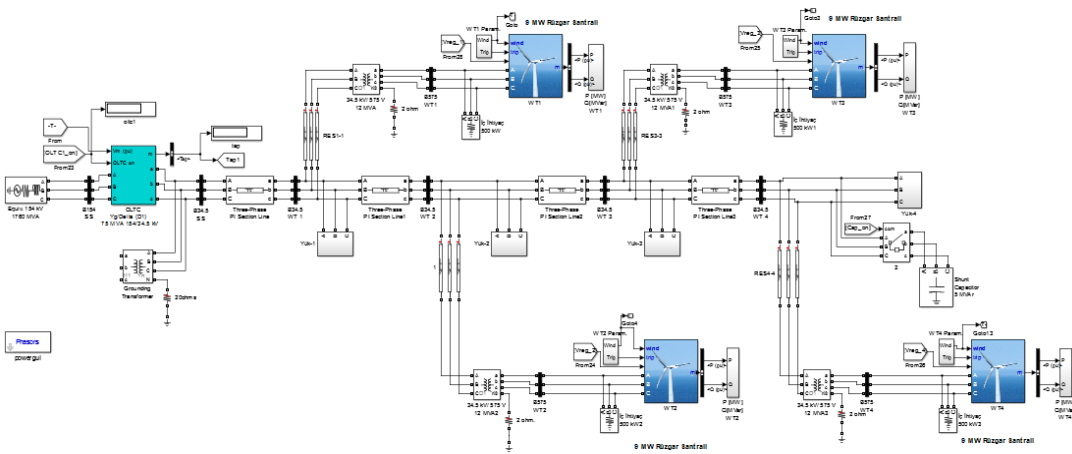
Rüzgar türbinini modellerken Simscape kütüphanesinde yer alan ÇBAG yapısına sahip rüzgar türbini tercih edilmiştir. Bunun sebebi sincap kafesli rotora sahip

generatör kullanan bu türbinlerin, aktif reaktif güç çıkışları, rotor ve şebeke arasında yer alan AC/DC/AC konverter yapısı ile kontrol edilebilmesidir [69]. Rüzgar türbinleri, şönt kapasitor, YAKD Şekil 5.1'de verilen akış diyagramına uygun olarak oluşturulmuş etmenler tarafından kontrol edilmektedirler.

Rüzgar santrallerinin üretim miktarları ve yüklerin talep miktarları gerçek şebekelerde olduğu gibi oluşturulan test sisteminde de farklılık göstermektedir. Farklı üretim, talep güçlerine göre sürekli hal gerilimi bozulup $\pm\%10$ limitlerinin dışına çıkabilmektedir. Bu gibi durumlarda ÇES tabanlı gerilim regülasyonunu gözlemlemek adına 3 farklı senaryo geliştirilmiştir.



Şekil 5.2 : Test sistemi tek hat diyagramı.



Şekil 5.3 : Simulink ortamında modellenmiş olan test sistemi.

5.3 Durum 1 – Tüm Santrallerin Devre Dışı Olduğu ve 4.Barada Yük Artışı Olduğu Durumda Şebeke Gerilim Düşümünün Düzeltilmesi

Modellenen rüzgar santrallerinin her biri ortalama bir rüzgar hızı olan 8 m/sn hızda 1.87 MW aktif güç üretmektedirler. Bu koşullar altında bara gerilimlerinde uygunsuz bir değer okunmamaktadır. Santrallerin yakın bölgelerde bulunduğu ve rüzgar hızının tüm santrallerde 8 m/sn'den 25 m/sn'ye yükseldiği varsayılıyor. Böylesi bir rüzgar hızında türbinlerin devreden çıktığı bilinmektedir. Artan rüzgar hızı neticesinde bütün santraller devre dışı kalır ve beklenildiği gibi bara gerilimleri düşer. ÇES devrede değil iken rüzgar santralleri devreden çıktığı zaman okunan bara gerilimleri Çizelge 5.1'deki gibidir.

Çizelge 5.1 : Rüzgar türbinlerinin devrede olmadığı durumda bara gerilimleri.

Bara Adı	Gerilim (pu)
Bara 1	0.951
Bara 2	0.922
Bara 3	0.903
Bara 4	0.894

Çizelge 5.1'de görüldüğü üzere 4.baranın gerilimi, nominal geriliminin %10 altına düşmüştür (0.894 pu). ÇES ile gerilimi düzenlemek adına, sisteme Şekil 5.1'de verilen kontrol diyagramı dahil edilir. Sistem yeniden analiz edilir. 4.baradaki gerilim düşümü 4.yük etmeni tarafından fark edilir ve 4.baradaki reaktif güç kontrol etmenine haber verilir. 4.barada yer alan şönt kondansatör devreye girer. Şönt kondansatörün devreye girmesi ile bara gerilimi düzeltilir. Son durumda 4.bara gerilimi izin verilen alt limitinin üzerine çıkmış olur (0.945 pu). ÇES ile gerilim kontrolü yapılmış olan sisteme ait bara gerilimleri Çizelge 5.2'de verilmiştir.

Çizelge 5.2 : ÇES ile gerilim regülasyonu yapıldığı durumda bara gerilimleri.

Bara Adı	Gerilim (pu)
Bara 1	0.966
Bara 2	0.950
Bara 3	0.943
Bara 4	0.945

Rüzgar türbinlerinin devrede olmadığı ve 4.baradaki şönt kondansatörün devrede olduğu durumda kararlı hal gerilimleri izin verilen sınırlar içerisinde. Durumu daha kötü hala getirmek, sistemin kontrol kabiliyetini test etmek amacıyla Yük 4'ün iki katı yük talep ettiğini varsayalım. 4.bara gerilimi bu şartlar altında Çizelge 5.3'ten

görüldüğü üzere 0.895 pu olur. ÇES ile gerilimi kontrol etmek istersek ÇES akışı şu şekilde gerçekleşir. 4.yük etmeni gerilim düşümünü algılar. Şönt kondansatör hâlihazırda devrede olduğu ve 4.baradaki diğer bir reaktif güç kontrol etmeni olan dağıtık üretim (RES-4) de devre dışı olduğu için akış diyagramı bir sonraki basamağa aktarılır. Bir sonraki seviyede yer alan YAKD'den gerilim desteği talep edilir. YAKD "-1" kademesine gelerek gerilimi yükseltir. Yapılan son analizde bara gerilimleri Çizelge 5.4'de görüldüğü gibi uygun değerlere çekilmiş olur.

Çizelge 5.3 : Yük-4'ün iki katı yük talep ettiği durumda bara gerilimleri

Bara Adı	Gerilim (pu)
Bara 1	0.951
Bara 2	0.923
Bara 3	0.904
Bara 4	0.895

Çizelge 5.4 : YAKD'nin devreye girdiği durumda bara gerilimleri.

Bara Adı	Gerilim (pu)
Bara 1	0.963
Bara 2	0.934
Bara 3	0.915
Bara 4	0.906

5.4 Durum 2 – 1 Adet Santralin Devre Dışı Olduğu Durumda Şebeke Gerilim Düşümünün Düzeltilmesi

İkinci senaryoda ise tek bir santralin devreden çıkması durumu incelenmiştir. Arıza veya benzer bir sebepten ötürü RES-3'ün devreden çıktığını varsayalım. RES-3'ün devreden çıktığı koşulda sistem analiz edilir. Analiz sonucunda bara gerilimlerinin beklendiği üzere düştüğü görülüyor (Çizelge 5.5). Ancak gerilim düşümü %10'un üzerinde olmadığı için yük etmenleri bir ihlal algılamamaktadır. Şebekede yer alan Yük-2, Yük-3, Yük-4 sistemleri sırasıyla 1.6, 2, 2.2 katına çıkartılarak sistemde gerilimin düşmesi gözlemlenmek isteniyor. Tekrar analiz edilen sistemde 4.baranın gerilim düşümünün %10'un üzerine çıktığı görülüyor. RES-3'ün devreden çıktığı durumdaki gerilimler Çizelge 5.5'ten, yüklerin daha fazla yük talep ettiği durumdaki bara gerilimleri ise Çizelge 5.6'dan görülebilmektedir.

Çizelge 5.5 : RES-3'ün devreden çıktığı durumda bara gerilimleri.

Bara Adı	Gerilim (pu)
Bara 1	0.962
Bara 2	0.952
Bara 3	0.945
Bara 4	0.939

Çizelge 5.6 : RES-3'ün devreden çıktığı ve yük artışı durumunda bara gerilimleri.

Bara Adı	Gerilim (pu)
Bara 1	0.936
Bara 2	0.917
Bara 3	0.903
Bara 4	0.889

Çizelge 5.6'dan da görüldüğü üzere 4.baranın gerilimi limit değerlerin altına düşmüştür (0.889 pu). ÇES ile gerilim regülasyonu yapar isek ÇES algoritması şu adımları takip edecektir. 4.yük etmeni gerilim ihlalini algılayarak ilgili reaktif güç kontrol etmenine haber verir. Bu durumda 4.barada yer alan RES-4 dağıtık üretimi, gerilimi düzeltmek için reaktif güç kontrol modundan gerilim kontrol moduna geçer. RES-4 şebekeye 0.727 MVar reaktif güç enjekte ederek bara gerilimini yükseltir. Son durumda 4.bara geriliminin 0.902 pu değerine yükseldiği gözlenir (Çizelge 5.7).

Çizelge 5.7 : ÇES ile gerilim regülasyonu yapıldığı durumda bara gerilimleri.

Bara Adı	Gerilim (pu)
Bara 1	0.946
Bara 2	0.928
Bara 3	0.915
Bara 4	0.902

5.5 Durum 3 – Tüm Santrallerin Üretimlerinin Arttığı Durumda Şebeke Gerilim Artışının Düzeltilmesi

Önceki iki senaryoda olduğu gibi başlangıçta 8 m/sn olan rüzgar hızının tüm santraller için 12 m/sn'ye çıktığını varsayalım. Bu durumda santrallerin üretim miktarları 1.87 MW değerinden 6.38 MW değerine yükselmektedir. Santrallerdeki üretim miktarının artış göstermesi bara gerilimlerinin artmasına sebep olmaktadır. Rüzgar hızında meydana gelen artışa bağlı olarak yükselen bara gerilimleri Çizelge 5.8'de verilmiştir.

Çizelge 5.8 : Rüzgar hızının arttığı durumda bara gerilimleri.

Bara Adı	Gerilim (pu)
Bara 1	1.064
Bara 2	1.068
Bara 3	1.069
Bara 4	1.069

Bara gerilimlerini limitlerin dışına çıkarmak ve ÇES ile gerilim regülasyonunu gözlemlemek adına, Yük-1, Yük-2 ve Yük-3 devreden çıkartılmıştır. Yük-4'ün değeri ise 2/5'sine düşürülmüştür. Baralardaki tüketim miktarlarının düşmesi gerilimi yükseltici yönde etki yapmıştır. Bu etkinin neticesinde 3.baradaki gerilim artışı %10'un üzerine, 1.102 pu değerine yükselmiştir (Çizelge 5.9).

Çizelge 5.9 : Rüzgar hızının arttığı durumda bara gerilimleri.

Bara Adı	Gerilim (pu)
Bara 1	1.093
Bara 2	1.099
Bara 3	1.102
Bara 4	1.100

ÇES ile gerilim regülasyonu yapılır ise, 3.yük etmeni gerilim artışının limitlerin üzerinde olduğunu fark eder. İlgili reaktif güç kontrol etmenine haber verir. 3.barada yer alan dağıtık üretim bilindiği gibi ÇBAG yapısı sayesinde şebekeden reaktif güç çekme kabiliyetine sahiptir. RES-3 gerilim kontrol moduna geçerek bara gerilimini düzenlemek adına şebekeden 3.56 MVar reaktif güç çekerek bara gerilimini düşürücü yönde etki yapar. Bu sayede 3.bar gerilimi izin verilen aralığa taşınmış olur (Çizelge 5.10).

Çizelge 5.10 : ÇES ile gerilim regülasyonu yapıldığı durumda bara gerilimleri.

Bara Adı	Gerilim (pu)
Bara 1	1.083
Bara 2	1.088
Bara 3	1.089
Bara 4	1.089

6. SONUÇLAR

Bu tezde dağıtım seviyesinden yapılan üretim entegrasyonunun sebep olduğu sorunlara genel anlamda değinilmiştir. Bu sorunlar içerisinde, dağıtık üretimin ve kullanıcıların, dağıtım şebekesinin kararlı hal geriliminde meydana getirdiği değişimler üzerine daha önce yapılan araştırmalar detaylıca incelenmiştir. Dağıtım şebekesi bazında izin verilen gerilim seviyeleri için yerel yönetmeliklerde ve uluslararası standartlarda belirtilen kriterler incelenmiştir. Dağıtım şebekesinde meydana gelen gerilim düzensizliklerini önlemek amacıyla kullanılan ekipmanların teknik özelliklerinden ve gerilim kontrol ekipmanlarına ilave olarak modern dağıtık üretimlerin yapısı gereği reaktif güç üretimlerini kontrol etme kabiliyetlerinden bahsedilmiştir.

Gelişen teknolojinin ve kurulu güçlerdeki artışın bir gereği olarak dağıtım sistemlerinde gerilim kontrol ekipmanlarının ve dağıtık üretimlerin koordineli ve hızlı bir şekilde kontrolü günümüz dağıtım şebekelerinin önemli bir ihtiyacı olduğu gibi gelecekte de popüler bir araştırma, geliştirme konusu olacağı aşikârdır. Bu amaçla başlarda bilgisayar bilimlerinde kullanılan ancak son yıllarda elektrik mühendisliğinin de faydalandığı ÇES teknolojisi üzerinde durulmuştur.

ÇES'in etmen ve haberleşme yapısında bazı varsayımlar yapılarak, radyal orta gerilim şebekesinde uygulanabilirliği olan ÇES'e dayalı bir akış diyagramı geliştirilmiş ve Şekil 5.1'de verilmiştir. Tasarlanan çok etmenli sistem algoritması ile gerilimi regüle etmek amaçlanmıştır. Bu akış diyagramı Simulink ortamında yük etmenleri, reaktif güç kontrol etmenleri ve YAKD etmenini içerecek şekilde modellenmiştir. Dağıtım sisteminde ÇES'e dayalı gerilim regülasyonu, 3 farklı durum için de başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

Durum 1'de sistemde yer alan rüzgar enerjisi santrallerinin devre dışı kaldığı ve talep yükün arttığı durumlarda gerilimin izin verilen değerin altına düştüğü gözlenmiştir. Tasarlanan ÇES şönt kondansatörü devreye alarak ve YAKD ile uygun kademe değerini belirleyerek gerilimi 0.9 pu'nun üzerine çıkarabilmiştir.

Durum 2'de bir adet santralin devre dışı kalması ve talep yükün artması durumlarında gerilimin 0.9 pu'nun altına düştüğü gözlenmiş. Bu gerilim düzensizliği ise ÇES'in rüzgar santrallerinden destek talep etmesi ve türbinlerinin reaktif güç kapasitelerinden faydalanılmasıyla giderilebilmiştir.

Durum 3'te ise diğer durumların aksine dağıtık üretimlerin literatürde bahsi geçen en temel olumsuz etkisi olan gerilim artışı problemi incelemiştir. Dağıtık üretimlerin enerji üretimlerinin artması ve talep yükün azalması sistemdeki bara gerilimlerini yükselttiği gözlemlenmiştir. Gerilimi düşürmek amacıyla ÇES algoritması durum 2'de olduğu gibi santrallerin reaktif güç kapasitesinden faydalanmış, sistemden reaktif güç çekerek gerilimi regüle edebilmiştir.

Yapılan simülasyon çalışmalarından da görülmüştür ki dağıtım sisteminde üretim ve tüketim kaynaklı değişimler gerilim düzensizliklerine sebep olabilmekte, gerilimler yönetmeliklerde belirtilen $\pm\%10$ değerinin dışına çıkabilmektedir. ÇES teknolojisinden faydalanılarak minimum haberleşme ve işletmesel operasyon ile gerilimi regüle etme imkânı olduğu bu çalışma ile gösterilmiştir. Test sisteminde gerilim kontrol ekipmanlarının bir bölümü kullanılmıştır. Dağıtım şebekelerinde yapılacak olan yük akışı ve dinamik analizler ile tespit edilen yetersizlikleri gidermek amacıyla gerekli ekipmanların kurulumu ve koordineli kontrolü sistem güvenilirliği açısından önem arz etmektedir.

Bu tez çalışmasında ÇES'in bazı varsayımlar ile MATLAB yazılımı üzerinde modellenip uygulanabilirliği gösterilmiştir. İleriki çalışmalarda JAVA tabanlı ve FIPA standartlarına uygun şekilde ideal etmen davranışlarını sergileyerek etmen haberleşmesini gerçekleştiren sistemlerin, dağıtım sistemi üzerinde kontrolünün incelenmesinde fayda görülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] **Dondi, P., Bayoumi, D., Haederli, Julian D., Suter, D.** (2002). Network Integration of Distributed Power Generation, *Journal of Power Sources*, Vol. 106, s.1-9.
- [2] **IEEE**, IEEE Application Guide for IEEE Std 1547™, IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems, *IEEE Std 1547.2TM-2008*.
- [3] **Carvalho, P., Correia, P., F., Ferreira, L.A.** (2008). Distributed Reactive Power Generation Control for Voltage Rise Mitigation in Distribution Networks, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 23, No. 2, s.766-772
- [4] **Hashim, T., T., Mohamed, A., Shareef, H.** (2012). A Review on Voltage Control Methods for Active Distribution Networks, *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review): Warszawa, Poland*, s.304–312.
- [5] **Tonkoski, R., Lopes, L., A., El-Fouly, T.H.** (2011). Coordinated Active Power Curtailment of Grid Connected PV Inverters for Overvoltage Prevention, *IEEE Transactions Sustainable Energy*, Vol. 2, s.139–147.
- [6] **Viawan, F., Karlsson, D.**, (2007). Combined Local and Remote Voltage and Reactive Power Control in the Presence of Induction Machine Distributed Generation, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 22, s.2003–2012.
- [7] **Sansawatt, T., Ochoa, L., F., Harrison, G., P.** (2010). Integrating Distributed Generation Using Decentralised Voltage Regulation, *Power and Energy Society General Meeting, IEEE* , vol., no., s.1-6.
- [8] **Zhou Q., Bialek, J., W.** (2007). Generation Curtailment to Manage Voltage Constraints in Distribution Networks, *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol.1, No.3, s.492-498.
- [9] **Viawan, F., A., Karlsson, D.** (2007). Combined Local and Remote Voltage and Reactive Power Control in the Presence of Induction Machine Distributed Generation, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.22, No.4, s.2003-2012.
- [10] **Toma, S., Senjyu, T., Miyazato, Y., Yona, A., Tanaka, K., Chul-Hwan Kim**, (2008). Decentralized Voltage Control in Distribution System Using Neural Network, *Power and Energy Conference, 2008. PECon 2008. IEEE 2nd International* , s.1557-1562.
- [11] **Toma, S., Senjyu, T., Yona, A., Sekine, H., Funabashi, T., Chul-Hwan Kim**, (2008). Optimal Control Of Voltage In Distribution Systems By Voltage Reference Management, *Power and Energy Conference, 2008. PECon 2008. IEEE 2nd International* , vol., no., s.1239-1244.

- [12] **Baerthlein, E., M., Hartung, M., Panosyan, A.** (2014). Variable Voltage Set Point Control of Tap Changers in Distribution Grids, Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe), 2014 IEEE PES , s.1-6.
- [13] **Hatta, H., Kobayashi H.** (2008). Demonstration Study On Centralized Voltage Control System For Distribution Line With Sudden Voltage Fluctuations, SmartGrids for Distribution, 2008. IET-CIRED. CIRED Seminar, s.1-4.
- [14] **Kulmala, A., Repo, S., Järventausta, P.** (2014). Coordinated Voltage Control in Distribution Networks Including Several Distributed Energy Resources, IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 5, No. 4, s.2010-2020
- [15] **Durfee, E., H., Lesser, V. R., Corkill D. D.** (1989). Trends In Cooperative Distributed Problem Solving, IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, KDE-1 s. 63 – 83.
- [16] **Baran, M., E., El-Markabi, I., M.** (2007) A Multiagent-Based Dispatching Scheme For Distributed Generators For Voltage Support On Distribution Feeders. IEEE Trans. Power Syst., Vol.22, No.1, s.52–59.
- [17] **Farag, H., E., El-Saadany, E.F.** (2013). A Novel Cooperative Protocol For Distributed Voltage Control in Active Distribution Systems, IEEE Trans. Power Syst. 2013, Vol. 28, s.1645–1656.
- [18] **Elkhatib, M., E., El-Shatshat, R., Salama, M.** (2011) Novel Coordinated Voltage Control For Smart Distribution Networks With DG. IEEE Trans. Smart Grid 2011, Vol. 2, s. 598–605.
- [19] **Aquino-Lugo, A., A., Klump R., Overbye, T., J.** (2011). A Control Framework for the Smart Grid for Voltage Support Using Agent-Based Technologies, IEEE Transactions on Smart Grid, Vol.2, No.1, s.173-180
- [20] **Lang, S., Niannian C., Mitra, J.** (2013). Multi-Agent System Based Voltage Regulation In A Low-Voltage Distribution Network, North American Power Symposium (NAPS), s.1-6.
- [21] **Yorino, N., Zoka, Y., Watanabe M., Kurushima, T.** (2015) An Optimal Autonomous Decentralized Control Method for Voltage Control Devices by Using a Multi-Agent System, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 30, no.5, s. 2225-2233.
- [22] **Sajadi, A., Farag, H., E., Biczel P., El-Saadany, E., F.** (2012) Voltage Regulation Based On Fuzzy Multi-Agent Control Scheme in Smart Grids, Energytech, 2012 IEEE , s.1-5.
- [23] **Farag, H. E., El-Saadany, E., F., Seethapathy, R.** (2012). A Two Ways Communication-Based Distributed Control For Voltage Regulation in Smart Distribution Feeders, IEEE Trans. Smart Grid, Vol. 3, No. 1, s. 271–281.
- [24] **Berthold, F., Carpita, M., Monti A., Ponci, F.** (2012). A Multi-agent Approach to Radial Feeder Voltage Control of PEBB-Based

Converter: A Real Time Simulation Test, Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), s.1990-1997.

- [25] **Tousi, M., R., Hosseinian, S., H., Jadidinejad A., H., Menhaj, M., B.** (2008). Multi-agent Based Voltage Control of STATCOMs to Enhance Elimination of Voltage Disturbances in Power System Contingencies, Universities Power Engineering Conference, UPEC 2008, 43rd International, s.1-5.
- [26] **Islam, S., R., Sutanto D., Muttaqi, K., M.** (2013). A Decentralized Multi-Agent Based Voltage Control For Catastrophic Disturbances in A Power System, Industry Applications Society Annual Meeting, 2013 *IEEE* , s.1,8.
- [27] **Pachanapan, P., Anaya-Lara O., Lo, K., L.** (2009). Agent-Based Control For Power Quality Enhancement In Highly Distributed Generation Networks, Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2009 Proceedings of the 44th International , s.1-5.
- [28] **Nguyen, P., H., Myrzik J., M., A., Kling, W., L.** (2008). Coordination of Voltage Regulation in Active Networks, Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2008. T&D. IEEE/PES , s.1-6.
- [29] **Arshad A.** (2015). Multi-Agent System Based Distributed Voltage Control in Distribution Systems. (Yüksek Lisans Tezi). Aalto University, School of Electrical Engineering, Espoo, Finland.
- [30] U.S.Department of Energy,“The Potential Benefits of Distributed Generation and Rate-Related Issues That May Impede Their Expansion: A Study Pursuant to Section 1817 of the Energy Policy Act of 2005”, Şubat 2007.
- [31] **Dai, C.** (2007). A Study of Voltage Regulation and Islanding Associated with Distributed Generation. (Doktora Tezi). University of Nevada, Las Vegas, USA.
- [32] Türkiye Elektrik Üretim-İletim 2016 Yılı İstatistikleri, Grafik I.I -Türkiye Kurulu Gücünün Yıllar İtibariyle Gelişimi. <www.teias.gov.tr>, erişim tarihi: 05.04.2018.
- [33] Türkiye Elektrik Üretim-İletim 2016 Yılı İstatistikleri, Grafik I.II - 2006 ve 2016 Yılları İçin Birincil Enerji Kaynaklarına Göre Türkiye Kurulu Gücü. <www.teias.gov.tr>, erişim tarihi: 05.04.2018.
- [34] **Uzun, S.** (2015). *Dağıtık Üretim Tesislerinin Şebeke Entegrasyon Etkileri ve Şebeke Uyumluluğunun Güç Sistem Analizleriyle Uygulamalı Değerlendirilmesi.* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [35] **Kojovic, L.** (2012). Impact of DG on Voltage Regulation, Proc. IEEE/PES Summer Meeting, s. 97 - 102, Temmuz 2002.
- [36] **Conti, S., Raiti, S., Tina, G., Vagliasindi, U.** (2001). Study of the Impact of PV Generation on Voltage Profile in LV Distribution Networks, Proc. IEEE Porto Power Tech Conference, Vol. 4, s. 1-6.

- [37] **Çetinkaya, H. B., Dumlu, F.** (2013). Dağıtık Üretim Tesislerinin Şebeke Entegrasyonunda Yaşanabilecek Olası Problemler ve Entegrasyon Analizleri, Akıllı Şebekeler ve Türkiye Elektrik Şebekesi'nin Geleceği Sempozyumu.
- [38] **Mahmud, M., A., Hossain, M., J., Pota, H., R.** (2011). Analysis of Voltage Rise Effect on Distribution Network with Distributed Generation, Preprints of the 18th IFAC World Congress, Milano, İtalya.
- [39] Elektrik Şebeke Yönetmeliği, 28 Mayıs 2014 Tarihli ve 29013 Sayılı Mükerrer Resmi Gazetede Yayımlanmıştır. <www.epdk.gov.tr>, erişim tarihi: 06.04.2018.
- [40] Elektrik Dağıtım ve Perakende Satışına İlişkin Hizmet Kalitesi Yönetmeliği, 21 Aralık 2012 Tarihli ve 28504 Sayılı Resmi Gazetede Yayımlanmıştır. <www.epdk.gov.tr>, erişim tarihi: 06.04.2018.
- [41] **Viawan, F., A.** (2008). *Voltage Control and Voltage Stability of Power Distribution Systems in the Presence of Distributed Generation*. (Doktora Tezi). Chalmers University of Technology, Department of Energy and Environment, Göteborg, İsveç.
- [42] **Barker, P.P., De Mello, R., W.** (2000). Determining the Impact of Distributed generation on Power Systems: Part 1 – Radial Distribution Systems, Power Technologies, Inc., *IEEE*.
- [43] **Bolijevic, S., Conlon, M., F.** (2008). The Contribution to Distribution Network Short-Circuit Current Level From the Connection Of Distributed Generation, Universities Power Engineering Conference, UPEC 2008, 43rd International.
- [44] Elektrik Piyasası Lisans Yönetmeliği, 1 Kasım 2013 Tarihli ve 28809 Sayılı Resmi Gazetede Yayımlanmıştır. <www.epdk.gov.tr>, erişim tarihi: 06.04.2018.
- [45] Elektrik Piyasası Dağıtım Yönetmeliği, 2 Ocak 2014 Tarihli ve 28870 Sayılı Resmi Gazetede Yayımlanmıştır. <www.epdk.gov.tr>, erişim tarihi: 06.04.2018.
- [46] Elektrik Piyasası Yan Hizmetler Yönetmeliği, 27 Aralık 2008 Tarihli ve 27093 Sayılı Resmi Gazetede Yayımlanmıştır. <www.epdk.gov.tr>, erişim tarihi: 06.04.2018.
- [47] Elektrik Piyasasında Lisanssız Elektrik Üretimine İlişkin Yönetmeliğin Uygulanmasına Dair Tebliğ, 2 Ekim 2013 Tarihli ve 28783 Sayılı Resmi Gazetede Yayımlanmıştır. < www.epdk.gov.tr >, erişim tarihi: 06.04.2018.
- [48] Dağıtım Tesislerine Bağlanacak Üretim Santralleri İçin Fider Kriterleri, < www.tedas.gov.tr >, erişim tarihi: 06.04.2018.
- [49] **Zad, B., B., Lobry J., Vallee, F.** (2013). Coordinated control of on-load tap changer and D-STATCOM for voltage regulation of radial distribution systems with DG units, Electric Power and Energy Conversion Systems (EPECS), 2013 3rd International Conference, s.1-5.
- [50] **Baggini, A.** (2008). Handbook of Power, Ed. John Wiley & Sons Ltd., New York, USA

- [51] **Gao C., Redern, M., A.** (2011). Automatic Compensation Voltage Control Strategy For On-Load Tap Changer Transformers With Distributed Generations, In *Advanced Power System Automation and Protection (APAP)*, 2011 International Conference on, Vol. 1, s. 737-741.
- [52] **Idris R., M., Zaid, N., M.** (2016). Optimal Shunt Capacitor Placement in Radial Distribution System, *IEEE International Conference on Power and Energy*.
- [53] **Kersting, W., H.** (2009). The Modeling And Application Of Step Voltage Regulators, *Power Systems Conference and Exposition, IEEE*, s. 1–8.
- [54] IEEE Std c57.15 - 2009, *IEEE Standard Requirements, Terminology, and Test Code for Step-Voltage Regulators*, Power & Energy Society, 2009.
- [55] **Parlak, D.** (2014). *12 Darbeli Tiristör Kontrollü Reaktör Tabanlı Reaktif Güç Kompanzasyonu Sistemlerinin Gerilim Regülasyonu İçin Tasarım, Uygulama Ve Mühendislik Yönleri*. (Yüksek Lisans Tezi). Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Ankara.
- [56] **Dixon, J., Moran, L., Rodriquez, J., Domke, R.** (2005). Reactive Power Compensation Technologies, State-of-the-Art Review, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 93, s.2144-2164.
- [57] **Bilgin, H., F.** (2007). Reaktif Güç Kompanzasyonu İçin Akım Kaynaklı Çevirgece Dayalı Statkom Tasarımı ve Uygulaması, (Doktora Tezi). Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Ankara.
- [58] **Hingorani N., G., Gyugyi, L.** (1999). *Understanding FACTS*, IEEE Press, New York, 1999
- [59] **Jenkins, N., Allan, R., Crossley, P., Kirchen, D., Strbac, G.** (2000) *Embedded Generation*. London, UK: The Institution of Electrical Engineers.
- [60] **Rossi, M., Viganò, G., Moneta, D., Clerici, D., Carlini, D.** (2016). Analysis Of Active Power Curtailment Strategies For Renewable Distributed Generation, *AEIT International Annual Conference (AEIT)*.
- [61] **Russell, S., J., Norvig, P.** (2010) *Artificial Intelligence: A Modern Approach* 3th ed2010: Prentice Hall.
- [62] **Uhrmacher, A., M., Weyns, D.** (2009). *Multi-Agent Systems Simulation and Applications*, Taylor and Francis Group, LLC, 2009.
- [63] **McArthur, S., D., J., Davidson, E., M., Catterson, V., M., Dimeas, A., L., Hatziargyriou, N., D., Ponci, F., Funabashi, T.** (2007). Multi-Agent Systems for Power Engineering Applications—Part I: Concepts, Approaches, and Technical Challenges, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.22, No.4, s.1743,1752.
- [64] **Albuz, Ç.** (2015). *Çok Etmenli Ortamlar İçin Cnp Tabanlı Müzakere Protokolü*. (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [65] **Bora, Ş.** (2006). *Çok Etmenli Organizasyonlarda Dinamik ve Adaptif Yedekleme Uygulayarak Aksaklığa Dayanıklılığın Gerçekleştirilmesi*. (Yüksek Lisans Tezi). Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.

- [66] **Zoka, Y., Yorino, N., Toga, N., Sugihara, H. (2009).** An Effective Voltage Control Scheme For Distribution Systems By Means Of Multi-Agents, Power Systems Conference and Exposition, *IEEE/PES* , s.1-8.
- [67] **Chen, X., Zhang, C., Zhang, W., Zhou, J. (2014).** Study Of Multi-Agent Based Distributed Control For Distribution System With Integration Of Distributed Generations, Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO), 2014 IEEE 8th International, vol., no., s.220-224.
- [68] **Gehao, S., Xiuceng, J., Yi, Z. (2005).** Optimal Coordination For Multi-Agent Based Secondary Voltage Control In Power System, Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific, 2005 *IEEE/PES* , s.1-6.
- [69] **Nguyen, H., P. (2010).** *Multi-Agent System Based Active Distribution Networks.* (Doktora Tezi). Department of Electrical Engineering, Eindhoven University of Technology, Eindhoven, Hollanda.



ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : Emre KÖKSAL
Doğum Tarihi ve Yeri : 05.07.1991 Kdz.Ereğli/Zonguldak
E-posta : koksalem@itu.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2014, Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- Kesir Mühendislik Elekt. Mak. İnş. San. Tic. Ltd. Şti. (2014-2017)
- Ereğli Demir ve Çelik Fabrikaları T.A.Ş (2017 - ...)