

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DAĞITILMIŞ ÜRETİM KAYNAKLARININ
ELEKTRİK DAĞITIM SİSTEMLERİNE ETKİLERİ**

YÜKSEK LİSANS

Elektrik Müh. Korhan KARAARSLAN

Anabilim Dalı: Elektrik Mühendisliği

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Ayşen BASA ARSOY

KOCAELİ, 2010

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DAĞITILMIŞ ÜRETİM KAYNAKLARININ ELEKTRİK
DAĞITIM SİSTEMLERİNE ETKİLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

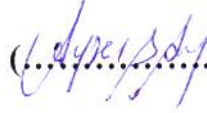
Elektrik Müh. Korhan KARAARSLAN

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 28 ARALIK 2009

Tezin Savunulduğu Tarih: 07 OCAK 2010

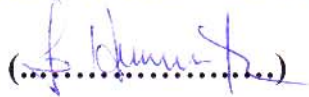
Tez Danışmanı

Yrd.Doç.Dr. Ayşen BASA ARSOY

()

Üye

Prof.Dr. Semra ÖZTÜRK

()

Üye

Yrd.Doç.Dr. Mehmet BAYRAK

()

KOCAELİ, 2010

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Elektrik üretiminin ilk yıllarında, elektrik enerji üretimi doğru akımla yapılmakta ve yakın civardaki tüketicileri beslemekteydi. Daha sonraları, teknolojik gelişmelerle birlikte elektrik enerjisi üretimi artmış ve düşük maliyetli daha uzun mesafelere iletme imkanı veren AC şebekeler ortaya çıkmıştır. Talep ve kaynağın dengelenmesi büyük miktardaki değişken yüklerin devreye alınıp çıkarılması ile gerçekleştirilmekteydi. Kaynak güvenilirliği arızalı enerji santralının, diğer santraller tarafından karşılanması ile sağlanmaktaydı.

Sürekli büyüyerek günümüze kadar gelen geleneksel yapıdaki bu elektrik enerji sistemleri teknik, ekonomik ve çevresel nedenlerden dolayı artık gereksinimleri karşılayamaz hale gelmiştir. Çözüm olarak yenilenebilir enerji kaynakları ve dağıtılmış üretim konusu gündemde yerini almıştır.

Yapılan literatür incelemesi sonucunda elde edilen kazanımlardan yola çıkarak literatüre farklı bir bakış açısı getirebilmek amacıyla gerçekleştirilen yüksek lisans tez çalışmasının ileride yapılacak olan çalışmalar için alt yapı oluşturması amaçlanmıştır.

Bu çalışma, “Dağıtılmış Elektrik Üretim Sistemlerinde Kontrol, Koruma, Güvenilirlik ve Kalite Fonksiyonlarının İncelenmesi” konulu 105E105 TÜBİTAK projesi tarafından desteklenmektedir.

Yüksek lisans tezimin hazırlanmasında yardımlarını esirgemeyen ve bana yol gösteren tez danışmanım Yrd.Doç.Dr. Ayşen BASA ARSOY’a, desteklerinden dolayı tüm mesai arkadaşlarıma ve manevi anlamda daima yanımda olan aileme teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLolar DİZİNİ	v
SİMGELER.....	vi
ÖZET	vii
İNGİLİZCE ÖZET	viii
BÖLÜM 1. GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2. DAĞITILMIŞ ÜRETİM.....	4
2.1. Dağıtılmış Üretim Tanımı	4
2.2. Dağıtılmış Üretim Teknolojileri.....	5
2.2.1. İçten yanmalı motor	7
2.2.2. Mikro türbin	7
2.2.3. Gaz türbini.....	8
2.2.4. Yakıt pilleri	8
2.2.5. Yenilenebilir enerji kaynakları.....	9
2.2.5.1. Rüzgar enerjisi	9
2.2.5.2. Mikro hidrolik enerji	12
2.2.5.3. Güneş enerjisi.....	13
2.2.5.4. Biyokütle enerjisi	13
2.2.5.5. Jeotermal enerji	14
2.2.6. Enerji depolama elemanları	15
2.3. Dağıtılmış Üretim Teknolojilerinin Karşılaştırılması	15
2.4. Dağıtılmış Üretim Sistemlerinin Gerekliği.....	17
BÖLÜM 3. DAĞITILMIŞ ÜRETİMİN ETKİLERİ	23
3.1. Güç Kalitesi.....	25
3.1.1. Gerilim profili	25
3.1.2. Frekans değişimi	26
3.2. Güvenilirlik	27
3.3. Koruma.....	29
3.3.1. Kısa devre	29
3.3.2. Ada çalışma.....	30
BÖLÜM 4. SİSTEMİN MODELLENMESİ	32
4.1. DIgSILENT Power Factory Programı	32
4.2. 13 Düğümlü IEEE Test Fideri.....	36
4.2.1. Yük modelleri.....	37
4.2.2. Paralel kapasitörler.....	38
4.2.3. Havai hattın geometrik yerleşimi ve iletken verileri.....	38
4.2.4. Yer altı kabloların geometrik yerleşimi ve kablo verileri:	39
4.3. PF ile 13 Düğümlü IEEE Test Fiderinin Modellenmesi	40
4.3.1. Elemanların modellenmesi.....	41
4.4. Asenkron Generatörlü Rüzgar Türbini Modeli.....	46

BÖLÜM 5. ANALİZ SONUÇLARI	52
BÖLÜM 6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	58
KAYNAKLAR	60
EKLER	63
ÖZGEÇMİŞ	75

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1: Rüzgar türbini blok diyagramı	10
Şekil 2.2: Generatör tipine ve şebekeye bağlantı türlerine göre rüzgar türbinleri.....	11
Şekil 2.3: Elektrik enerji sistemi ve dağıtılmış üretimin entegrasyonu.....	18
Şekil 3.1: Dağıtılmış üretim kaynağı bağlantı konfigürasyonları	24
Şekil 3.2: Gerilim profili ve gradyanının değişimi.....	26
Şekil 3.3: a noktasındaki kısa devre durumundaki akımlar I_f , I_{dg} , I_{nw}	29
Şekil 3.4: Tekrar kapama süreci	31
Şekil 4.1: Power Factory ana pencereleri	34
Şekil 4.2: Bir elemana ait verilerin düzenleme menüsü ile girilmesi.....	34
Şekil 4.3: Veri yapılanması	35
Şekil 4.4: Veri yöneticisi	36
Şekil 4.5: 13 düğümlü IEEE test fideri.....	37
Şekil 4.6: Havai hattın geometrik yerleşimi	39
Şekil 4.7: Tam alüminyum 15kV konsantrik nötr iletken	39
Şekil 4.8: Bir projenin görüntülenmesi	40
Şekil 4.9: Terminal veri girişi penceresi	41
Şekil 4.10: İletken karakteristiklerine ait veri girişleri.....	42
Şekil 4.11: İletkenlerin geometrik yerleşim verilerinin girilmesi	42
Şekil 4.12: İletkene ait elektriksel değerlerin elde edilmesi.....	43
Şekil 4.13: Yer altı kablosuna ait verilerin girilmesi.....	43
Şekil 4.14: Transformator veri girişi	44
Şekil 4.15: Projede oluşturulan transformatöre ait verilerin girilmesi	44
Şekil 4.16: Yük verilerinin girilmesi.....	45
Şekil 4.17: Asenkron generatörlü rüzgar türbini bileşenleri	48
Şekil 4.18: Kanat açısı kontrol birimi blok diyagramı	49
Şekil 4.19: Türbin blok diyagramı	50
Şekil 4.20: Şaft (mekanik sürüş) blok diyagramı	51
Şekil 5.1: PF’de oluşturulmuş 13 düğümlü IEEE test fiderine ait tek hat şeması.....	52
Şekil 5.2: Üç faz-toprak kısa devre arızası dalga şekilleri	57

TABLolar DİZİNİ

Tablo 2.1: Küçük ölçekli DÜK teknolojilerinin genel karakteristikleri.....	16
Tablo 2.2: Dağıtılmış üretim teknolojileri ve faydaları.....	17
Tablo 4.1: Yük Modellerine ait kodlar	37
Tablo 4.2: İletken verileri	38
Tablo 4.3: Tam alüminyum 15 kV konsantrik nötr iletken verileri.....	39
Tablo 4.4: 15 kV tam alüminyum bantlı kablo.....	40
Tablo 4.5: Yük modelinin belirlenmesi	45
Tablo 5.1: Yük akışı sonuçları.....	54
Tablo 5.2: Üç faz-toprak kısa devresi sonuçları	55
Tablo 5.3: Tek faz-toprak kısa devresi sonuçları	56

SİMGELER

A	: Kanat tarama alanı
C_p	: Kinetik enerjinin aerodinamik faktörü
E_k	: Kinetik enerji
f_i	: Tekrar kapama cihazının frekansı
kpu	: Aktif güç gerilim katsayısı.
kqu	: Reaktif güç gerilim katsayısı
P	: Aktif güç
P_0	: Başlangıç aktif güç değeri
P_w	: Havanın aerodinamik gücü
q	: Hava akışı
Q	: Reaktif güç
Q_0	: Başlangıç reaktif güç değeri
R	: Kanat yarıçapı
t_i	: Ölü zaman aralığı
T_w	: Aerodinamik moment
V	: Gerilim değeri
V_0	: Başlangıç gerilim değeri
v_w	: Rüzgar hızı
Δf	: Frekans değişimi
θ	: Kanat açısı
λ	: Uç hızı oranı
ω	: Uç hızı
ρ	: Hava yoğunluğu

Kısaltmalar

AC	: Alternative current--alternatif akım
ACSR	: Aluminium conductor steel reinforce--çelik özlü alüminyum iletken
CIGRE	: International Council on Large Electric Systems
CIREN	: International Conference and Exhibition on Electricity Distribution
DC	: Direct current--doğru akım
DG	: Distributed generation--dağıtılmış üretim
DİgSILENT	: Dİgital Sİmulation and Electrical Network calculation program
DÜ	: Dağıtılmış üretim
DÜK	: Dağıtılmış üretim kaynakları
IEA	: International Energy Agency
IEEE	: The Institute of Electrical and Electronics Engineers
PF	: Power Factor
PV	: Photovoltaic--fotovoltaik
UPS	: Uninterruptable Power Supply--kesintisiz güç kaynağı

DAĞITILMIŞ ÜRETİM KAYNAKLARININ ELEKTRİK DAĞITIM SİSTEMLERİNE ETKİLERİ

Korhan KARAARSLAN

Anahtar Kelimeler: Dağıtılmış üretim, yenilenebilir enerji kaynakları, radyal elektrik enerji sistemleri, rüzgar türbini

Özet: Elektrik enerjisi endüstrisindeki son gelişmeler dağıtılmış enerji üretimine büyük bir ilgi uyandırmıştır. Enerji üretimindeki ve kontrol teknolojilerindeki gelişmeler de dağıtılmış üretimi, belli bölgelerde ve birçok uygulamada geleneksel elektrik üretimine göre tercih edilir duruma getirmiştir.

Tüketim merkezlerine yakın yerleştirilmiş, farklı karakteristiklere sahip üretim kaynakları içeren dağıtılmış üretim sistemleri tez konusu olarak belirlenmiştir. Bu amaçla, önce konu hakkında literatürdeki çalışmalar incelenmiştir. Yapılan incelemeler sonucunda, dağıtılmış üretimin tanımı yapılmış ve dağıtılmış üretim kaynak teknolojileri tanıtılmıştır.

Dağıtılmış üretim kaynakları içeren elektrik dağıtım sistemleri, bu duruma göre tasarlanmamış bir sistemde beklenmeyen değişiklikler ya da problemlere yol açabilir. Bununla birlikte, elektrik üretim ve tüketiminin aynı bölge içinde kalmasını sağlayarak, hat kayıplarının azalması gibi birçok yararları da beraberinde getirecektir. Son 20 yıldır, literatürde yer alan dağıtılmış üretimin sisteme olan etkileri bu çalışmada özetlenmiştir.

Bu çalışma kapsamında, ayrıca, dengesiz üç fazlı elektrik dağıtım sisteminde dağıtılmış üretimin sürekli durum ve geçici durum etkileri, örnek bir sistem üzerinde benzetim çalışması yapılarak gösterilmiştir. Dengesiz üç fazlı elektrik dağıtım sistemi olarak birçok farklılığı içinde barındıran 13 düğümlü IEEE test fideri, dağıtılmış üretim kaynağı olarak da asenkron generatörlü rüzgar türbini ve senkron generatör seçilerek benzetim modelleri oluşturulmuştur.

Son olarak, benzetim modeli gerçekleştirilen sistemde yük akışı analizleri yapılmıştır. Dağıtılmış üretim kaynağı farklı noktalara yerleştirilerek gerilim profiline olan etkileri gözlenmiştir. Kısa devre analizleri yapılarak arıza akımlarının değişimleri incelenmiştir. Ayrıca, geçici durumda rüzgar türbinine ait asenkron generatörün cevabı grafiksel olarak gösterilmiştir. Modelleme ve analiz çalışması için DIGSILENT Power Factory programı kullanılmıştır.

Tüm bu çalışma sürecinde elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, dağıtılmış üretimin sistem gerilim profiline olumlu katkılar sağladığı, arıza durumlarında ise oluşabilecek arıza akımlarının büyüklüğü ve yönü göz önüne alınarak koruma sistemleri ayarlarının yeniden düzenlenmesi gerektiği sonucuna varılmaktadır.

IMPACTS OF DISTRIBUTED GENERATION RESOURCES ON ELECTRICAL DISTRIBUTION SYSTEMS

Korhan KARAARSLAN

Keywords: Distributed generation, renewable energy resources, radial electric power systems, wind turbine

Abstract: Recent developments in electrical industry have raised a great deal of interest in distributed power generation. Advances in power generation and power control technologies have also made DG increasingly competitive with conventional grid-supplied electricity in certain regions and for numerous applications.

Distributed generation systems with different characteristics, located to nearby consumption points have been chosen for this study. For this purpose, literature review is the first stage of this study. As a result of literature review, distributed generation is defined and distributed generation resource technologies are described.

Electrical distribution systems, which include distributed generation sources, may cause any unexpected behavior or faults, as the system isn't designed for this topology. However, there would be many advantages such as reduced line losses as the generation and consumption of electrical energy is provided in the same region. The impact of distributed generation on electric distribution systems, which is taking part in the literature over the last two decades, is summarized in this study.

Within the scope of this study, steady-state and transient effects of distribution generation on unbalanced three phase system have been demonstrated with a simulation on a sample system. An IEEE 13 node test feeder with numerous features has been taken to represent an unbalanced three-phase electrical distribution system. A synchronous generator and a wind turbine with an induction generator have been chosen as distributed generation source in the simulation.

Finally, power flow analyses are implemented on the simulated power system. Effects of the distributed generation source on the system voltage profile are studied, by connecting it at different nodes. By short circuit analyses, its effects on fault currents are realized. Additionally, transient response of the induction generator of wind turbine is graphically represented in case of short circuits.

Consequently, obtained results show that, distributed generation has positive impacts on system voltage profile and, the magnitude and directions of fault currents have to be taken into consideration to rebuilt protection systems settings.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Günümüzde, fosil yakıt kaynaklarının azalması, enerji kalitesinin düşük olması ve çevresel kirlilik konuları, dünya çapında geleneksel elektrik enerji sistemlerinin karşı karşıya kaldığı sorunlar olarak görülmektedir. Oluşan bu sorunlar, dağıtım gerilimi seviyesinde yerel olarak kullanılan doğalgaz, biyogaz, rüzgar enerjisi, fotovoltaik piller, yakıt hücreleri, birleşik ısı-güç sistemleri ve mikro-türbinler gibi yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarına olan eğilimi arttırmıştır. Bu tip enerji üretimine Dağıtılmış Üretim (DÜ) ve bu tip enerji üretiminde kullanılan enerji kaynaklarına da Dağıtılmış Üretim Kaynakları (DÜK) adı verilmektedir. Dağıtılmış üretim terimi, enerji üretimi anlayışı açısından merkezi olan geleneksel enerji üretiminden ayırt edilebilmek amacıyla kullanılmaya başlanmıştır.

1990'lı yılların sonuna doğru, dağıtılmış üretimi ilgilendiren temel konular CIGRE (International Council on Large Electric Systems) ve CIRED (International Conference and Exhibition on Electricity Distribution) tarafından incelenerek geniş çaplı raporlar sunulmuştur [1,2].

2001 yılında Ackermann, dağıtılmış üretimin tanımındaki farklılıklardan yola çıkarak bir çalışma gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada dağıtılmış üretimin amacı, kapasite değerleri, yerleşimi, teknolojisi ve çevresel etkileri konularındaki görüş ayrılıkları ortaya konmuş ve sonuç olarak genel bir tanım önerisi sunulmuştur [3].

2004 yılında El-Khattam, Ackermann'inkine benzer nitelikte bir çalışma gerçekleştirmiştir. Dağıtılmış üretim tanımını oluşturan kısıtlamalardan bahsetmiş ve uygulanan dağıtılmış üretimin teknik ve ekonomik yararlarını ele almıştır [4].

2005'te Pepermans, küçük ölçekli enerji üretimi olarak tanımladığı dağıtılmış üretimi ve küçük ölçekli üretim teknolojilerini tablolar aracılığıyla karşılaştırmalı olarak ortaya koymuştur. Sonuç olarak ise çok farklı üretim teknolojilerini ve

uygulama alanlarını kapsadığı için dağıtılmış üretim hakkında kesin bir tanım oluşturulamadığı belirtilmiştir [5].

Dağıtılmış üretim ve dağıtılmış üretim kaynakları 2000’li yıllarda literatürde sıkça karşılaşılan çalışmalar arasına girmiştir. Buna neden olarak, yeni gereksinimlerin doğması, teknik, ekonomik ve çevresel yararların da göz önünde bulundurulması gösterilebilir. Genel olarak, yapılan çalışmalarda dağıtılmış üretimin etkileri dağıtılmış üretim kaynakları ele alınarak incelenmiş ve etkilerinin güç akışı, güç kalitesi ve güvenilirlik konuları adı altında sınıflandırıldığı görülmüştür.

Dağıtılmış üretimin güç akışına etkilerini konu alan çalışmalarda genel olarak radyal yapıdaki dağıtılmış elektrik sistemlerinde geliştirilen güç akışı yazılımları kullanılmış, kısa devre analizleri yapılmış, koruma dizayn ve koordinasyonuna olan etkileri incelenmiştir [6–10].

Birçok çalışmada, dağıtılmış üretim teknolojisine bağlı olarak ortaya çıkabilecek güç kalitesi problemlerine değinilmiş, yaygın şekilde kullanılacak DÜK’nın mevcut güç kalitesine etkileri belirtilmiştir [11–15].

Güç sistemlerinin güvenilirliğini belirlemede kullanılan indeksler üzerinde dağıtılmış üretimin etkisini konu alan çalışmalar da literatürde yerini almıştır [16–19].

Yapılan literatür çalışmaları incelendiğinde, dağıtılmış üretimin tanımı, dağıtılmış üretimin elektrik dağıtım sistemlerindeki etkileri ve dağıtılmış üretim kaynaklarının modellenmesi konularında araştırmalar yapıldığı görülmektedir. Bu tezde, örnek bir dağıtım sistemi üzerinde dağıtılmış üretimin etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır.

Bu amaçla, tezin birinci bölümünde konu ile ilgili literatürde yer alan çalışmalar incelenmiş, tezin amacına yer verilmiş ve tez çalışmasının genel bir tanıtımı yapılmıştır.

İkinci bölümde, dağıtılmış üretimin tanımı yapılarak literatürde yer alan dağıtılmış üretim kaynakları tanıtılmıştır. Ayrıca dağıtılmış üretimin gündeme gelmesine neden olan konular ele alınmıştır.

Üçüncü bölümde, dağıtılmış üretimin elektrik dağıtım sistemlerine olan etkileri güç kalitesi, koruma ve güvenilirlik konuları ele alınarak anlatılmıştır.

Dördüncü bölümde, modelleme çalışması hakkında bilgi verilmiştir. Bu amaçla, modellenenin gerçekleştirileceği DIgSILENT Power Factory programı tanıtılmış, 13 düğümlü IEEE test fideri verileri sunulmuştur. Ayrıca asenkron generatörlü rüzgar türbini modeli de bu bölümde yer almıştır.

Beşinci bölümde, oluşturulan sistemde gerçekleştirilen güç akışı ve kısa devre analizlerinden elde edilen sonuçlar tablolar halinde sunulmuştur. Ayrıca, bir kısa devre anında rüzgar türbinine ait parametrelerin değişimi grafikler yardımıyla gösterilmiştir.

Altıncı bölümde bu tezde elde edilen sonuçların değerlendirilmesi yapılmıştır.

BÖLÜM 2. DAĞITILMIŞ ÜRETİM

2.1. Dağıtılmış Üretim Tanımı

Dağıtılmış üretim için kesin ve net bir tanım belirlenmemiş olmakla beraber, genel olarak küçük güçlü elektrik enerji üretim birimlerini ifade etmek amacıyla kullanılmaktadır. Ancak bu tanım dağıtılmış üretimin sınırlarını tam olarak belirlememektedir. Bazı ülkeler dağıtılmış üretimi gerilim seviyesi ile tanımlarken, bazıları da tanımlarında tüketici tarafına bağlı olma şartına yer vermektedirler. Dağıtılmış üretimin tanımı konusunda 1990'lı yılların sonlarına kadar CIRED tarafından üye ülkeler arasında yapılan bir ankette ortak bir görüşe ulaşılamamıştır.

Literatürde kullanılan ifadelerdeki değişiklikler nedeniyle dağıtılmış üretimin tanımını kesinleştirmek için amacı, yerleşimi, kapasite oranı, güç dağıtım alanı, teknolojisi, çevresel etkisi, çalışma şekli, mülkiyeti ve dağılımı konuları irdelenerek bir tanım oluşturulmuştur. Buna göre; dağıtılmış üretim, tüketici merkezlerine yakın dağıtım şebekesine bağlı ya da bağımsız çalışan üretim kaynaklarını içermektedir[5].

Dağıtılmış üretimin tanımında, üretim kapasitesinden bahsedilmemektedir. Bunun nedeni bir dağıtım şebekesine bağlanabilecek dağıtılmış üretim kapasitesinin şebeke kapasitesinin bir fonksiyonu olmasıdır. Ancak, farklı güç değerlerindeki dağıtılmış üretim birimlerinin;

- Mikro ölçek: 1–5 kW,
- Küçük ölçek: 5kW-5MW,
- Orta ölçek: 5–50 MW,
- Büyük ölçek: >50 MW

olmak üzere kategorilere ayrılması kullanışlı olacaktır [3].

2.2. Dağıtılmış Üretim Teknolojileri

Dağıtılmış üretim birimlerinin sınıflandırılması genel olarak farklı tiplerdeki kaynakların çalışma prensibine göre yapılmaktadır. Elektriksel uygulamalar, kaynak süresi, üretilen gücün tipi ve yenilenebilir teknolojiler açısından birçok sınıflandırma söz konusudur. Ayrıca, kullanılan yakıt türüne bağlı olarak da bir gruplandırma yapmak mümkündür.

Geniş bir uygulama alanında gereksinimleri karşılayabilmek için çeşitli dağıtılmış üretim teknolojilerinden yararlanılmaktadır. Uygulamalar yük gereksinimlerine göre farklılık göstermektedir. Sonuç olarak kullanılacak dağıtılmış üretim birimleri de farklılaşmaktadır. Bu uygulamaların bazılarında aşağıda bahsedilmektedir [4];

- Yedek çalışma: Dağıtılmış üretim birimi, kesinti süresince hastanelerde ve proses endüstrilerinde olduğu gibi hassas yüklerin enerji ihtiyaçlarının karşılanmasında yedek güç kaynağı olarak kullanılabilir.
- Bağımsız çalışma: Şebekeye bağlantılarının pahalı olacağı coğrafi açıdan birçok engelin bulunduğu bölgelerin enerji ihtiyacını karşılamak amacıyla dağıtılmış üretim birimleri kullanılabilir.
- Azami yük paylaşımı: Elektrik enerjisi maliyetleri yük talep eğrilerine ve o andaki üretime göre değişim göstermektedir. Bu nedenle, azami yük talebinin olduğu periyotlarda maliyeti azaltacak dağıtılmış üretim birimleri kullanılabilir.
- Kırsal ve uzak uygulamalar: Dağıtılmış üretim birimi şebekeden bağımsız olarak aydınlatma, ısıtma, soğutma, iletişim ve küçük endüstriyel kuruluşların enerji ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla kullanılabilir.
- Birleşik ısı-güç üretimi: Dağıtılmış üretim biriminden elde edilen ısı enerjisi hastanelerde, büyük ticari sahalarda ve proses endüstrisinde kullanılabilir.
- Temel yük: Şebekeye ait dağıtılmış üretim birimleri gereksinim duyulan temel yükü sağlayarak sistem gerilim profilini yükseltir, güç kayıplarını azaltır ve sistemin güç kalitesini artırır.

- Besleme süresi ve güç tipi: Çıkış gücü süresi, dağıtılmış üretim biriminin büyüklüğüne, tipine ve uygulama alanına göre değişim gösterir. Besleme süresi temel yük uygulamaları için uzun, yenilenebilir kaynaklardan elde edilen enerji için kararsız ve şebeke kesintileri anında kısa olabilir.
- Kapasite: Dağıtılmış üretim birimlerinin kapasiteleri tam olarak belirtilmemekle birlikte en genel sınıflandırma kullanıcı tipine ve uygulamaya göre değişim göstermektedir.
- Üretilen enerji tipi: Elde edilen elektrik akımı doğru akım veya alternatif akım olabilir. Yakıt pilleri, fotovoltaikler ve bataryalar doğru akım üretirlerken mikro türbin ve rüzgar enerjisi santralleri alternatif akım üretirler.
- Teknoloji: Dağıtılmış üretim birimlerinin sınıflandırılmasında kullanılan yakıtın fosil yakıt olup olmadığı da bir karşılaştırma konusu olarak ele alınabilir.

Yapısal ve kullanılan teknoloji açısından farklı birçok dağıtılmış üretim birimi mevcuttur. Dağıtılmış üretim teknolojileri sınıflandırmasında genel olarak aşağıdaki gibi bir gruplandırma yapılabilir.

- İçten Yanmalı Motor
- Mikro Türbin
- Gaz Türbini
- Yakıt Pilleri
- Yenilenebilir Enerji Kaynakları
 - Rüzgar Enerjisi
 - Mikro Hidrolik Enerji
 - Güneş Enerjisi
 - Biyokütle Enerjisi
 - Jeotermal Enerji
- Enerji Depolama Elemanları

Yukarıda adı geçen dağıtılmış üretim teknolojilerinin bazıları verimleri, kullanım alanları ve maliyet konuları açısından aşağıda ayrıca ele alınmıştır.

2.2.1. İçten yanmalı motor

İçten yanmalı motorların (pistonlu) hızları boyutlarına bağlı olarak değişmektedir. Genel olarak küçük makinalar yüksek hızlarda çalışırken, daha büyükleri düşük hızlara sahiptirler. Elektrik şebekesi ile senkron çalışacakları düşünülürse, 50 Hz'lik bir şebeke için dönme hızları 1000, 1500 veya 3000 d/dk iken, 60 Hz'lik bir şebeke için bu değerler 1200, 1800 ve 3600 d/dk olarak belirlenmektedir.

Performans açısından bakıldığında, yüksek hızlı motorlar büyük bir çıkış gücü temin edebildikleri gibi boyutları da göz ününe alındığında çok yüksek enerji yoğunluğuna sahip oldukları söylenebilmektedir. Büyük boyutlu ve düşük hızlı motorlar ise daha verimlidirler. Göstermiş oldukları bu farklılıklar nedeniyle motor seçiminde uygulama alanı önem kazanmaktadır. Büyük, düşük hızlı motorları temel yük ihtiyacını karşılamak amacıyla kullanmak uygunken küçük, yüksek hızlı motorların maliyet açısından bakıldığında yedek enerji kaynağı olarak kullanılmaları daha uygun görülmektedir.

2.2.2. Mikro türbin

Çeşitli sıvı ve gaz yakıt (doğal gaz, fuel-oil, propan, ...) ile çalışabilen mikro türbinler küçük kapasiteli gaz türbinleridir. En temel haliyle, kompresör, yanma hücresi, ısı değiştirici, küçük bir türbin ve generatörden oluşmaktadır. Kompresör, türbin ve generatör aynı mil üzerine akuple edilmektedir. Bu tasarım şekli, verimi az da olsa etkilemektedir ancak basit olması bakım süresini uzatmaktadır. Havalı veya yağlı mil yatağına sahip mikro türbinler 100000 d/dk gibi yüksek hızlarda çalışmaktadırlar. Hava yataklı millerde ani kalkış anları haricinde metalin metale teması önlenmiş olmaktadır. 0,4–1 m³ hacme ve 20–500 kW kapasiteye sahiptirler[4].

Mikro türbinler, yerleşim alanının sınırlı olduğu yerlerde bilinen gaz türbinlerine göre avantaj sağlamaktadırlar. Verimleri yüksek, atık gaz emisyonları düşüktür. Kullanılan teknoloji iyi bilinmektedir. Kolaylıkla devreye alınabilirler ve yük izleme karakteristikleri iyidir. Basit tasarımları nedeniyle az bakıma ihtiyaç duymaktadırlar. Diğer dağıtılmış üretim birimlerine göre daha az kurulum maliyetine sahiptirler.

Hareketli parçalarının ataleti düşüktür. Şebeke ve yük arasında kullanılan modern DC-AC dönüştürücü birimi kontrolleri verimli kılmaktadır.

Çalışma şekline göre basit çevrim, iyileştirilmiş çevrim ve kombine çevrim gaz türbini olmak üzere üç çeşit mikro türbin mevcuttur. İyileştirilmiş çevrim gaz türbinlerinde türbinden çıkan atık ısı enerjisi özel bir ısı değiştirici yardımıyla yanma hücresine aktarılarak yanma işleminin veriminin artması sağlanmaktadır. Kombine çevrim gaz türbininde atık enerji ısı dönüştürücülü bir buhar generatörüne aktarılmaktadır. Oluşan buhar ile türbin döndürülerek çıkış elektriksel gücü arttırılmaktadır.

2.2.3. Gaz türbini

Gaz türbinleri, dağıtılmış üretim açısından bakıldığında mikro türbinlere oranla daha büyük kapasiteye sahip olmalarından dolayı kullanım alanları farklılık göstermektedir. 25 MW kapasiteden daha küçük olanlarında kombine çevrim türbin modeli görülürken bu değer üstünde basit çevrim türbin modeli kullanılmaktadır. En uygun kullanım şekli birleşik ısı-güç santralleri ile birlikte uygulanmasıdır. Bu şekilde elde edilecek toplam verim % 80–85 değerlerine ulaşabilmektedir.

2.2.4. Yakıt pilleri

Yakıt pilleri, elektrokimyasal işlemler sonunda kimyasal enerjiden elektrik enerjisi ve ısı enerjisi elde etmek amacıyla tasarlanmış cihazlardır. Çeşitli gaz ve sıvı yakıtları kullanarak ısı ve elektrik enerjisi açığa çıkarmaktadırlar. Yakıt olarak doğal gaz, benzin veya propan gibi hidrojen açısından zengin yakıtlar kullanılabilir. Yakıt pilleri çeşitli basınç ve sıcaklıklarda çalışabilmektedirler. Kimyasal reaksiyonun gerçekleştiği sıcaklık değerlerine göre PEMFC (polimer elektrolit membran) , AFC (alkalin), PAFC (fosforik asit), MCFC (eriyik karbonat), SOFC (katı oksit) ve DMFC olarak gruplandırılmaktadırlar.

Yakıt pili, bir elektrolit ile ayrılmış iki elektrottan meydana gelmektedir. O₂, katottan geçerken H₂ de anottan geçmektedir. Katalizör hidrojeni iyon haline dönüştürürken

oluşan elektron da elektrik enerjisi elde etmek için kullanılmaktadır. Daha sonra hidrojen iyonu ile oksijen birleşerek ürün olarak su oluşturmaktadırlar.

Yakıt pili, düşük gerilimli doğru akım üretmektedir ve atık gaz (NO_x , CO_2) oranı çok düşüktür. Yakıt işleyici ünite, yakıtı hidrojen zengin buhara çevirme amacıyla kullanılmaktadır. Elde edilen doğru akım, DC-AC dönüştürücü yardımıyla şebekenin kullanabileceği alternatif akıma dönüştürülmektedir.

Yakıt pilleri kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine %60 verimle çevirebilmektedirler. Yakıt pompaları ve hava kanalları haricinde hareketli parçalara sahip olmadıklarından dolayı gürültüleri azdır. Gaz emisyonlarının yok denebilecek kadar az olması nedeniyle çevre dostu olarak düşünülebilmektedirler. Isı ve elektrik enerjisi aynı anda elde edilebildiği için gelecekte ticari ve özel binaların aydınlatma ve ısıtılmasında kullanılabilirler. Elektriksel açıdan bakıldığında zamanla yakıt pillerinin iç empedansı büyümektedir. Bu nedenle çıkış gerilimini düzenlemek amacıyla bir güç elektroniği devresi kullanılmak zorundadır [4].

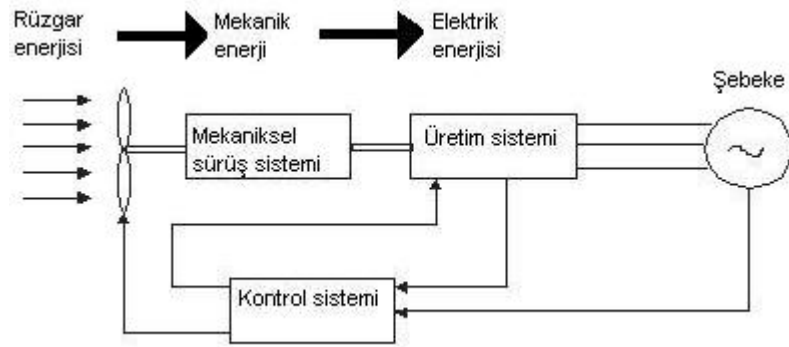
2.2.5. Yenilenebilir enerji kaynakları

2.2.5.1. Rüzgar enerjisi

Rüzgardaki kinetik enerjinin bir kısmını bir elektrik generatörünü döndürmek için kullanan dağıtılmış üretim birimlerine rüzgar türbini adı verilmektedir. Bir rüzgar türbini genel olarak rotor, rotora bağlı pervaneler, generatör, sürücü ve akuple cihazı, şaft, dişli kutusu ve generatör sürücüsünden oluşan türbin başlığını içermektedir. Şekil 2.1'de yer alan basitleştirilmiş rüzgar santrali modeli aşağıda listelenen alt sistemlerden oluşmaktadır [20].

- Rüzgar enerjisini döndürme momentine çeviren türbin rotoru
- Dişli sistemini de içeren mekanik sürüş sistemi
- Generatör ve güç elektroniği elemanlarından oluşan üretim sistemi
- Şebeke ile uyumlu çalışmayı sağlayan kontrol sistemi

Rüzgardan elde edilen kinetik enerji ile pervaneler döndürülmekte, pervaneler de bağlı bulunduğu generatör şaftını (milini) çevirerek mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmektedir. Burada rüzgardan sağlanacak güç değeri rüzgar hızının küpü ile doğru orantılı olarak değişmektedir. Rüzgar enerjisinden elde edilecek elektrik enerjisi iki farklı şekilde olabilmektedir. Rüzgar hızından bağımsız olarak sabit hızda dönen bir makinadan alternatif akım frekansında elektrik enerjisi üretilmektedir. Bir diğer yöntem ise değişken rüzgar hızında mili döndüren asenkron generatörün üreteceği elektrik enerjisidir.



Şekil 2.1: Rüzgar türbini blok diyagramı

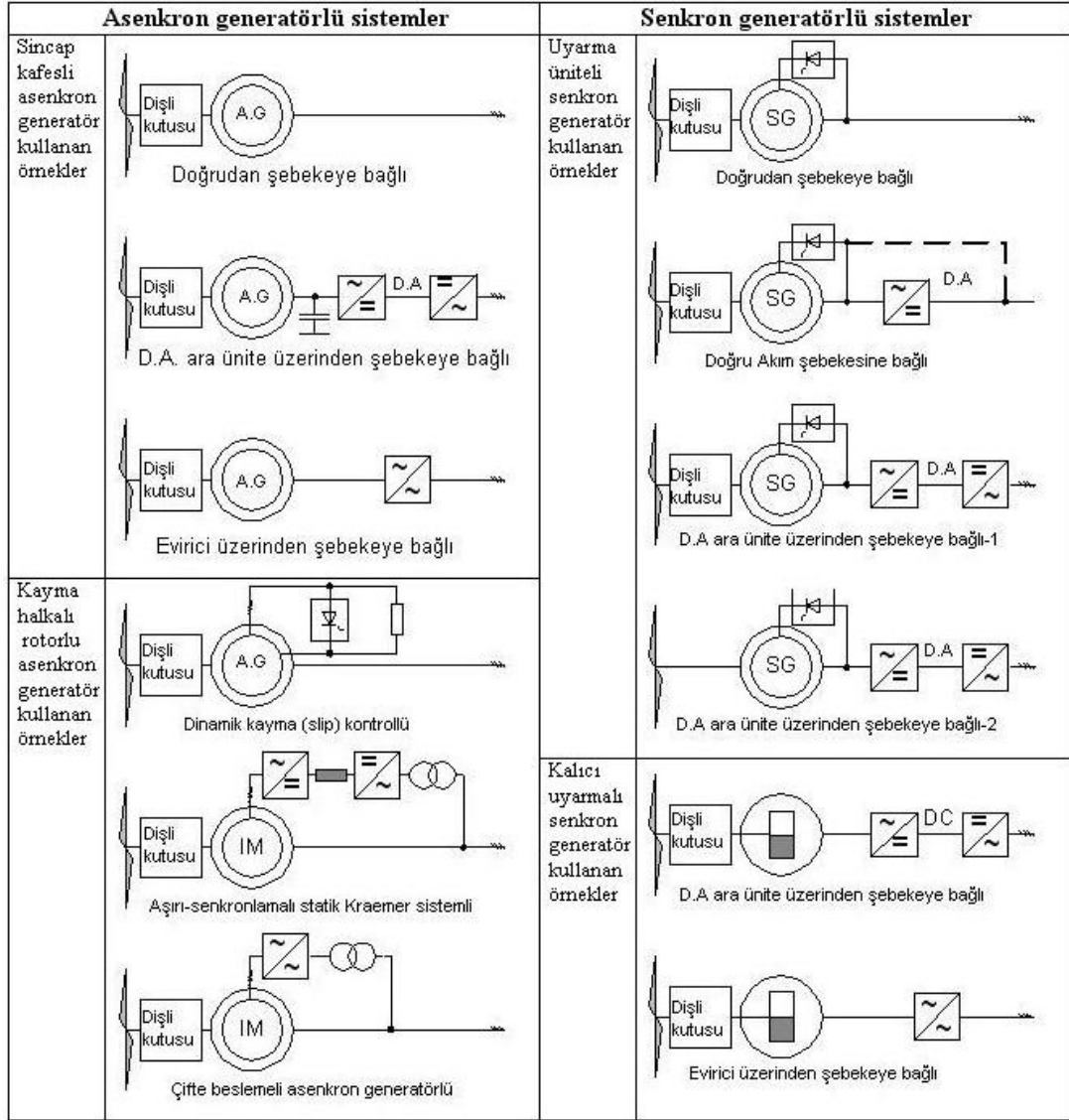
Rüzgar santralleri kullanılan türbin teknolojileri açısından değerlendirildiğinde,

- Sabit veya değişken kanat açısı kontrollü
- Sabit veya değişken generatör hızlarında çalışabilme
- Asenkron veya senkron generatör kullanma
- Evirici üzerinden veya doğrudan şebekeye bağlı olma
- Dişli ünitesi veya doğrudan sürürlü mekanik aktarım sistemleri kullanma

özelliklerine sahip olmalarına göre sınıflandırılmaktadırlar.

Rüzgar türbini üreticisi firmalar tarafından en çok tercih edilen rüzgar türbini tasarımları arasında klasik sistem olan kaçırma (stall) kontrollü, sabit hızlı asenkron generatörlü türbin ile değişken hızlarda çalışabilen kanat açısı kontrollü çifte beslemeli asenkron generatörlü türbin ve doğrudan sürürlü senkron generatörlü

türbinler yer almaktadır. Şekil 2.2’de literatürde geçen asenkron ve senkron generatörlü türbin tasarımları yer almaktadır [20].



Şekil 2.2: Generatör tipine ve şebekeye bağlantı türlerine göre rüzgar türbinleri [20]

Klasik sistemlerin en etkin özelliği kurulum maliyetlerinin değişken hızlarda çalışabilen yeni nesil türbinlere göre düşük olmasıdır. Güç elektroniği sistemi kullanarak rotor direncini ayarlayabilen sincap-kafesli asenkron generatörlerde rotor hızında geçici olarak %10’luk bir artış yapabilmek mümkün olmaktadır. Ayrıca, türbin rotorunda dişli sistemi kullanan ve generatör çıkışının tamamen evirici sistem üzerinden besleyen sincap kafesli asenkron generatörleri ile klasik senkron generatörleri kullanan uygulamalar da mevcuttur [21].

60 m rotor çapına sahip bir rüzgar türbini ancak 2 MW kapasiteye sahip olabilmektedir. Bu nedenle istenilen miktardaki elektrik enerjisi birçok rüzgar türbininin bir arada olduğu rüzgar türbini çiftliği ile elde edilebilmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken konular türbinler arası mesafe ve türbin kulelerinin yüksekliğidir. Ayrıca rüzgarın yönü de dikkate alınmalıdır.

Rüzgar enerjisi ile elektrik üretiminde yakıt söz konusu olmadığından gaz emisyonu sorunu yoktur. Bu açıdan rüzgar türbinlerinin çevreye bir zararları yoktur. Ancak rüzgar türbini çiftliklerinin gürültü sorunundan bahsedilebilmektedir. Zamanla tükenebilecek bir yakıt kullanılmadığından gelecek vaat eden bir enerji kaynağı olarak görülmektedir. Ayrıca yakıt fiyatları sürekli artarken rüzgar enerjisi maliyetleri gelişen teknoloji ile giderek düşmektedir.

2.2.5.2. Mikro hidrolik enerji

Hidroelektrik sistemler suyun akışından elde edilen kinetik enerjiyi türbin ve generatör yardımıyla elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerdir. Mikro hidroelektrik enerji birimlerinde genellikle 2–3 MW kurulum gücü mertebelerine kadar asenkron generatörlerin (bağlantı yapılan şebekede başka generatör varsa), 3–10 MW arasında ise senkron generatörler kullanıldığı görülmektedir.

Mikro hidroelektrik enerji birimleri temelde, akarsu (düşük düşülü) kurulumu ve su depolama (yüksek düşülü) kurulumu olmak üzere iki farklı tipte kurulmaktadır. Doğrudan akarsu üzerine kurulan mikro hidroelektrik enerji birimleri suyun akışına bağlı olarak üretim yapmaktadır, hatta akarsu yatağında kuraklık olması durumunda üretimin tamamen durması söz konusudur. Ancak kurulumu kolay ve maliyet etkin olduğu için çoğu bu tiptedir. Suyu barajlarda olduğu gibi depolayan yüksek düşülü mikro hidroelektrik enerji birimlerinde ise enerji üretim karakteristiği çok daha düzenlidir. Buna karşın, suyu tutacak olan rezervuar alanının inşasının maliyeti yüksek olup özellikle şehir merkezlerinden uzak yerleşim yerleri için ekonomik yönden uygun olmamaktadır.

Genel olarak 2.5 ile 25 MW arasında değişen kapasitelere sahiptirler. Türbin verimi (%80–90), dişli verimi (%95), generatör verimi (%93–97) ve cebri boru hattı iletim verimine (%90) bağlı olarak değişen toplam verimleri %65–80 civarlarındadır.

2.2.5.3. Güneş enerjisi

Fotovoltaik (PV) enerji üretimi, güneş enerjisinin doğrudan elektrik enerjisine dönüştürüldüğü yarı iletken elemanlar aracılığı ile gerçekleşmektedir. Bu yarı iletken kristal silisyum, amorf silisyum, galyum arsenit, kadmiyum tellürid ve bakır indiyum diselenid gibi malzemelerden elde edilmektedir.

Güneş ışığı aktif yüzeye geldiğinde enerjinin bir kısmı yarıiletken malzeme tarafından emilmekte ve bu enerji elektronları uyararak hücrenin altına ve üstüne yerleştirilmiş metal kontaklar arasında bir akımın akmasına yardımcı olmaktadır. Bir fotovoltaik hücreden elde edilebilecek akım ve gerilim çok düşük seviyelerde olduğundan birçok hücre seri ve paralel bağlanarak fotovoltaik modülleri, fotovoltaik modüller de güneş panellerini oluşturmaktadır. Bir fotovoltaik hücreden elde edilebilecek gerilim 0,5 V, yüzey alanına ve güneş ışığı miktarına bağlı olarak akım da 2–4 A aralığındadır [4]. Daha fazla gerilim sağlamak için hücreler seri olarak bağlanırken, elde edilecek akımı arttırmak için de paralel bağlantı kullanılmaktadır.

PV'ler birçok uygulama alanına sahiptirler. Haberleşmede, yol işaretlerinin aydınlatılmasında, evlerin ısıtılması ve aydınlatılması için çatı projelerinde ve yol aydınlatmasında kullanım alanı bulmaktadırlar. Yaz günlerinde, azami yük taleplerinin olduğu anlarda gerekli yükün bir kısmını sağlayabilirler. SCADA uygulamaları için PV-dizel hibrid sistemler ve DC yükler için birleşik PV-batarya sistemleri görülen diğer formlardır.

2.2.5.4. Biyokütle enerjisi

Biyokütle; biyolojik kökenli fosil olmayan organik madde kütesidir. Ana bileşenleri; karbon-hidrat bileşikleri olan bitkisel veya hayvansal kökenli tüm doğal maddeler biyokütle enerji kaynağı, bu kaynaklardan elde edilen enerji ise biyokütle (biomass) enerjisi olarak tanımlanmaktadır. Biyolojik kaynaklar; ağaç veya ağaç artıkları, tahta

yapımı endüstri artıkları, yiyecek endüstrisi artıkları, kanalizasyon ve belediyeye ait katı atıklar ve diğer biyolojik atıklardır. Bu yüzden biyokütle; elektrik üretimi, ulaşım ve ısınmada gaz yakıt olarak kullanılmakla birlikte ekonomik gelişim ve çevresel sebeplerden dolayı da cazip hale gelmektedir.

2.2.5.5. Jeotermal enerji

Jeotermal enerji, yerkabuğu içerisinde hazne kayalarda bulunan, basınç altında aşırı derecede ısınmış suların içerdiği bir enerjidir. Ekonomik önemdeki jeotermal enerji birikimi, sıcaklığı 40°C–380°C arasında olup, 3000 metreye kadar olan derinliklerde geçirimsiz kayalar altında yer alan, geçirimli hazne kayalar içinde bulunmaktadır. Bugüne kadar yapılan araştırmalar, üç jeotermal sistemin varlığını ortaya koymaktadır. Bunlar, sıcak su sistemi, kuru buhar sistemi ve sıcak kuru kaya sistemleridir.

Sıcak su sisteminden elde edilen jeotermal akışkan, üzerindeki basıncın azalması ile su-buhar fazlarına ayrılmaktadır. Ayrılan buhar, jeotermal santrallere gönderilerek, elektrik enerjisine dönüştürülmekte, atık su ise, diğer ısıtma sistemlerinde kullanılmakta veya yeraltına basılmaktadır. Yaş buhar, buhar yüzdesinin ve entalpisinin yüksek olması durumunda elektrik üretimi için daha verimli olmaktadır.

Yerkabuğunun derinliklerinden elde edilen kızgın kuru buhar ise, doğrudan jeotermal santrallere gönderilerek elektrik enerjisine dönüştürülmektedir.

Elektrik üretimi için en elverişli jeotermal kaynaklar, yüksek sıcaklıklı ve yüksek entalpili kuru buhar sistemleridir. Bunların sıcaklıkları 250°C–380°C arasında değişmektedir. Çok az nemliliğe sahip buhar, kızgın kuru buhar olarak tanımlanmaktadır [22].

Bugünkü enerji gereksinimi karşısında jeotermal kaynakların enerji üretimine olan katkısı küçük görülebilir. Ancak bu enerji türünün araştırılması ve yararlanma biçimi ile ilgili çalışmaların oldukça yeni olması da gözden uzak tutulmamalıdır.

Tükenirliği olmayan, yenilenebilen bu enerji kaynağı üzerinde, çalışmalar sürdürülmekte, özellikle yararlanma biçimleri konusunda yeni araştırmalar yapılmaktadır.

2.2.6. Enerji depolama elemanları

Elektrik enerjisi, elektriksel olarak depolanamamakla birlikte alternatif akım enerjisi başka enerji formlarında saklanabilmektedir. Bataryalar (elektrokimyasal enerji), volanlar (kinetik enerji), ultra kapasitörler (elektriksel yük) ve süper iletken manyetik enerji (elektromanyetik) depolama elemanları yk talebinin düşük olduğu zamanlarda şarj edilmekte ve kısa süreli ihtiyaçlarda kullanılmaktadırlar. Enerjinin depolanması iki faktör tarafından belirlenmektedir. Bunlardan biri depolanacak enerji miktarı, diğerisi ise enerjinin depolanmasındaki hızdır. Yukarıda bahsedilen depolama teknikleri hem yüksek verimlidir hem de hızlı şarj/deşarj işlemlerini gerçekleştirebilmektedirler. Örneğin, volanlar ile 5 saniyede 700 kW elektriksel güç elde edilebilmektedir [23].

2.3. Dağıtılmış retim Teknolojilerinin Karşılaştırılması

Tablo 2.1’de küçük ölçekli dağıtılmış üretim kaynaklarının kapasiteleri, uygulama alanları, verimleri ve kullandıkları yakıtlar belirtilmektedir. Döner makina kaynaklı dağıtılmış üretim kaynaklarından (içten yanmalı motor, gaz türbini ve mikro türbini) elde edilebilecek toplam verim birleşik ısı-güç santrallerinde kullanıldığında artmaktadır. Yakıt pilleri teknolojisi verimi diğerlerine oranla yüksek görünse de yakıt maliyetleri bu teknolojinin ne çıkmasını engellemektedir. Yakıt maliyetleri ve atık gaz emisyonları açısından bakıldığında Tablo 2.2’de grldğu gibi yenilenebilir enerji kaynaklı rüzgar ve güneş enerjisi teknolojileri avantaj sağlamaktadır. Ancak, azami yk talebinin olduğu anlarda yenilenebilir enerji kaynakları yerine bu talebi daha hızlı karşılayabilecek ve kararlı döner makinalı teknolojiler tercih edilmektedir. Ayrıca, mikro türbini, yakıt pili, rüzgar ve güneş enerjisi teknolojileri güç elektroniği tabanlı dönüştürücülere gereksinimi Tablo 2.2’de belirtilmektedir.

Tablo 2.1: Küçük ölçekli DÜK teknolojilerinin genel karakteristikleri [5]

Teknoloji	Kapasite	Verim (%)	Uygulama Alanları	Yakıt
İçten yanmalı motor	Dizel 20 kW–10 MW IEA Gaz 5 kW–5 MW IEA Genel olarak < 1 MW	36–43 IEA 28--42 IEA	Acil ve yedek servis, CHP	*Dizel, fuel oil, biyodizel *Doğal gaz, biyogaz
Gaz türbini	1–20 MW IEA	21- 40 IEA	CHP	*Gaz, kerosen
Mikro türbin	30 kW–200 kW IEA 35 kW–1 MW Küçük ölçekli uyg.< 1kW	25–30 IEA	CHP	*Doğal gaz *Yanıcı atık gazlar ve biyogaz
Yakıt pili	50 kW–1 MW IEA	35–60 IEA	CHP UPS	*Metanol, hidrojen veya doğal gaz
Fotovoltaik	> 1kW IEA > 20 kW Hücre sayısı ile arttırılabilir		Evsel ve küçük ticari uyg. Şebeke harici uyg.	*Güneş
Rüzgar	200 kW–3 MW			*Rüzgar

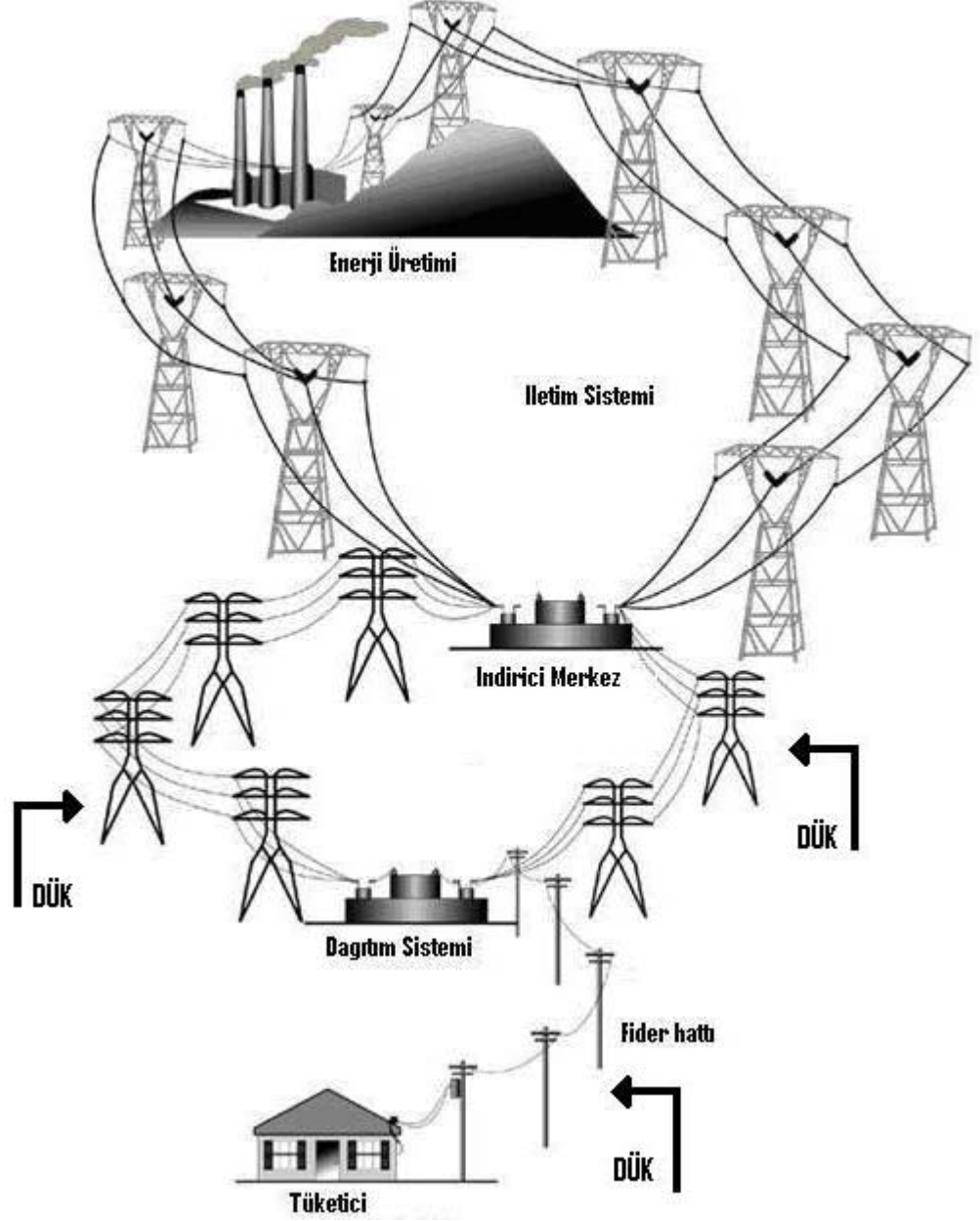
Tablo 2.2: Dağıtılmış üretim teknolojileri ve faydaları [5]

Teknoloji	Yedek servis	Mak. Talep Paylaşımı	Güç Elektromiği	Temiz Enerji	Ucuz Yakıt
İçten yanmalı motor	Evet	Evet	Hayır	Evet-Hayır	Evet-Hayır
Gaz türbini	Evet	Evet	Hayır	Evet-Hayır	Evet-Hayır
Mikro türbin	Evet	Evet	Evet	Evet-Hayır	Evet-Hayır
Yakıt pili	Evet	Hayır	Evet	Evet-Hayır	Hayır
Fotovoltaik	Hayır	Hayır	Evet	Evet	Evet
Rüzgar	Hayır	Hayır	Evet	Evet	Evet

2.4. Dağıtılmış Üretim Sistemlerinin Gerekliliği

Teknolojik gelişmelerle birlikte elektrik enerjisini daha uzun mesafelere iletme imkanı veren geleneksel elektrik enerji sistemleri artan üretimle birlikte ortalama maliyetleri düşürmüştür. Ancak, günümüze kadar gelen bu yapıda kapasite ve enerji kalitesi konuları çerçevesinde baş gösteren değişimler alternatif enerji arayışlarını beraberinde getirmektedir. Mevcut yapının tekrar yapılanmasının da çok zor olması sonucunda alternatif enerjinin sisteme entegrasyonu çözüm olarak belirmektedir.

Şekil 2.3'te, varolan elektrik enerji sistemine ilave edilen dağıtılmış üretim kaynakları gösterilmektedir.



Şekil 2.3: Elektrik enerji sistemi ve dağıtılmış üretimin entegrasyonu

Geleneksel elektrik enerji sistemlerinin sağlamış olduğu avantajlara rağmen aşağıda belirtilen teknik, ekonomik ve çevresel yararların göz önünde bulundurulması sonucu dağıtılmış üretim sistemlerine olan eğilim artmaktadır:

- Hızla artan elektrik enerjisi ihtiyacını karşılamak için büyüyen geleneksel elektrik enerji sistemi, rezervleri azalan fosil yakıta daha fazla ihtiyaç duymaktadır.
- Artma eğiliminde olan elektrik enerjisi ihtiyacına mevcut sistemin istenilen güvenilirlikte cevap verememesi ve yeniden yapılandırmanın ekonomik olmaması alternatif arayışlara neden olmaktadır.
- Kyoto Protokolü'ne göre birçok ülke iklim değişikliğini engellemek ve küresel ısınmaya karşı sera gazları emisyonunu düşürme çabası içerisinde. Bu nedenle, çevresel kirliliğin ve küresel ısınmanın göz önünde bulundurulması yenilenebilir enerji kaynaklarının fosil yakıtlara tercih edilmesine neden olmaktadır.
- Isı gereksiniminin önemsenecek derecede olduğu yerlerde birleşik ısı-güç santrallerinin kullanımı daha uygun bir çözüm yöntemi olarak görülmektedir. Bu tipteki kojenerasyon birimleri dağıtılmış üretimde geniş bir uygulama alanı bulmaktadır. Kojenerasyon birimlerinin büyüklüğüne ve verimine bağlı olarak %10 ile %30 arasında enerji tasarrufu sağlanabilmektedir. Dolayısıyla, kojenerasyon ve birleşik ısı-güç santrallerinin kurulmalarına olanak sağlaması açısından dağıtılmış üretim tercih edilebilir.

Elektrik enerjisi üreticilerinde dağıtılmış üretim konusuna olan ilginin arttığı görülmektedir. Bunun nedeni dağıtılmış üretimin liberal bir piyasadaki eksiklikleri tamamlayabilecek bir araç olarak görülmesidir. Böyle bir piyasada, tüketici kendisine en uygun elektrik servisini seçecektir. Kısacası, dağıtılmış üretim elektrik sektöründe rol alanlara piyasa şartlarını değiştirmeleri için esnek bir yol sağlamaktadır. Dağıtılmış üretim birimleri de küçük boyutları, merkezi üretim sistemlerine göre kısa olan yapım süreleri ve ekonomik alandaki değişimlere adaptasyon konusunda daha esnek olabilmektedirler.

Dağıtılmış üretimin gündeme gelmesinde kaynak kalitesi veya güvenilirlik konusu da etkili olmaktadır. Güvenilirlik problemleri elektrik kaynağındaki kesintilerle ilgilidir. Çoğu Avrupa ülkesinde güvenilirlik seviyesi, yüksek mühendislik standartları nedeniyle yeterli seviyededir. Ancak ABD gibi liberal bir piyasada, yüksek güvenilirlik seviyelerinin temini için yatırım ve bakım maliyetlerinin de yüksek

olması gerekmektedir. Rekabetçi piyasalarda maliyet etkili olacağından güvenilirlik seviyesi de düşecektir. Bununla birlikte, bazı endüstriler (kimya, petrol, kağıt, metal, telekomünikasyon , ...) için güvenilir bir enerji kaynağı çok önemlidir. Bu alanlarda çalışan firmalar merkezi üretim sisteminin sağladığı elektriği güvenilir bulmadıkları için harcamalarını dağıtılmış üretim birimleri yönünde yaparak istedikleri güvenilirlik seviyelerine ulaşabilirler.

IEA (International Energy Agency), enerji kesintileri için yakıt pilleri ve UPS sistemleri ile birleştirilmiş yedek sistemleri önermektedirler. Ayrıca depolama elemanları ile birleşik gaz ve dizel motorlar da başlangıç zamanını karşılamak için ticarileştirilmiştir [24].

Güç kalitesi konusu da güvenilirliği kapsamaktadır. Düşük güç kalitesi; gerilim azalması, kesinti veya geçici olayların oluşmasına neden olan arızalar ve anahtarlamalardan; yüklerden kaynaklanan hızlı gerilim değişimlerinden, harmonikler ve faz dengesizliğinden dolayı oluşabilir. Bu problemler sistemin kısa devre kapasitesi ile ilgilidir ve güç kalitesindeki bozulmadan korunmak için sistemin belirlenmiş minimum kısa devre kapasitesi garanti altına alınmalıdır.

Dağıtılmış üretim ile güç kalitesi arasındaki ilişki belirsizdir. Genel olarak, dağıtılmış üretim birimleri gerilim profilinde iyileşmeye neden olmaktadır. Ancak büyük miktarda dağıtılmış üretim biriminin sisteme entegrasyonu gerilimde, çift yönlü güç akışından kaynaklanan kararsızlıkla sonuçlanmaktadır. Buna ek olarak, çift yönlü güç akışı koruma sisteminde de ayarlamaları zorlaştırmaktadır.

Merkezi üretim birimlerinin verimlilik oranları % 28 ile % 35 arasında değişmektedir. Buna karşılık % 40–55 oranları küçük yakıt pillerinde ve çeşitli yüksek teknolojlili gaz türbinleri ile kombine çevrim birimlerde elde edilebilen değerlerdir. Çoğu zaman %45 verim elde edilemez bir değerdir. Ancak modern dağıtılmış üretim birimleri merkezi enerji üretim birimlerine göre daha fazla verim sağlayabilmektedir. IEA' ya göre iletim ve dağıtım maliyetlerinde %30'a varan düşmeler dağıtılmış üretim ile mümkün olabilmektedir [5].

Merkezi üretim birimlerinin küçük üretim birimlerine olan üstünlükleri 20. yüzyılın ikinci yarısından sonra azalmaya başlamıştır. Bu değişimin dört nedeni vardır:

- Gaz türbinlerindeki son gelişmeler daha ekonomik yeni generatörlerin oluşmasına neden olmuştur. Küçük gaz türbinlerinin verimi % 30'lar seviyesinde olmasına rağmen boyutları dağıtılmış üretim üniteleri olarak kullanılmasına imkan sağlamaktadır.
- İzolasyon alanındaki gelişmeler daha küçük gaz üretim birimlerinin yapılmasına olanak sağlamaktadır.
- Merkezi üretim birimlerinin yakıt maliyeti avantajı yakıt maliyetlerinin düşmesi ile önemini kaybetmiştir.
- Otomasyon ve kontrol teknolojilerindeki gelişmeler enerji üretimindeki maliyetleri düşüşe geçirmiştir (Personel, bakım-denetleme ihtiyaçları, ...).

Dağıtılmış üretim birimlerinin sisteme entegrasyonu birçok faydayı da beraberinde getirmektedir. Bu faydalar maliyet, elektrik enerji sisteminin çalışması ve çevresel açıdan olmak üzere üç farklı başlık altında incelenir. Aşağıda dağıtılmış üretim ile elde edilebilecek tüm faydalar sıralanmıştır;

- Planlama aşamasında olan bir elektrik enerji sisteminde iletilecek gücü azaltır, yeni iletim hatlarına gereksinimi ortadan kaldırır.
- Kolaylıkla modüller halinde istenilen yere kurulabilirler. Kurulum süresi kısadır ve modüller birbirinden bağımsız çalışabilirler. Kapasite yeni modüller eklenerek istenildiği zaman artırılabilir.
- Yerleşim yerinin uygun seçilmesi ile enerji fiyatları düşürülebilir. Ancak yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanan dağıtılmış üretim birimlerinin yerleşimi belirli coğrafi koşullara bağlıdır.
- Tüketicinin yük talebini tam olarak karşılayabilecek şekilde boyutlandırılabilirler.
- Kojenerasyon teknolojisini kullanan dağıtılmış üretim birimlerinde verim artırılarak ekonomiklik sağlanır.
- Şebekeye güç sağlayarak enerji maliyetlerinin düşmesini sağlar.

- Dağıtılmış üretim teknolojilerine bağı olarak kullanılacak enerji kaynağı veya yakıt tipi çeşitlendirilebilir. Böylelikle tek bir enerji kaynağı veya yakıt bağımlılık azalır.
- Yük kayıplarını azaltarak sistemde gerilim profiline iyileşmesini sağlar.
- Azami yük durumlarında yük paylaşımı için kullanılabilir.
- Sistemin sürekliliği ve güvenilirliği konularında yardımcı olur.
- Acil durumlarda ve kesinti anında yük ihtiyacını karşılamak için kullanılır.
- Yenilenebilir enerji kaynakları teknolojisine sahip dağıtılmış üretim birimleri ile çevreye olan emisyon azaltılabilir.

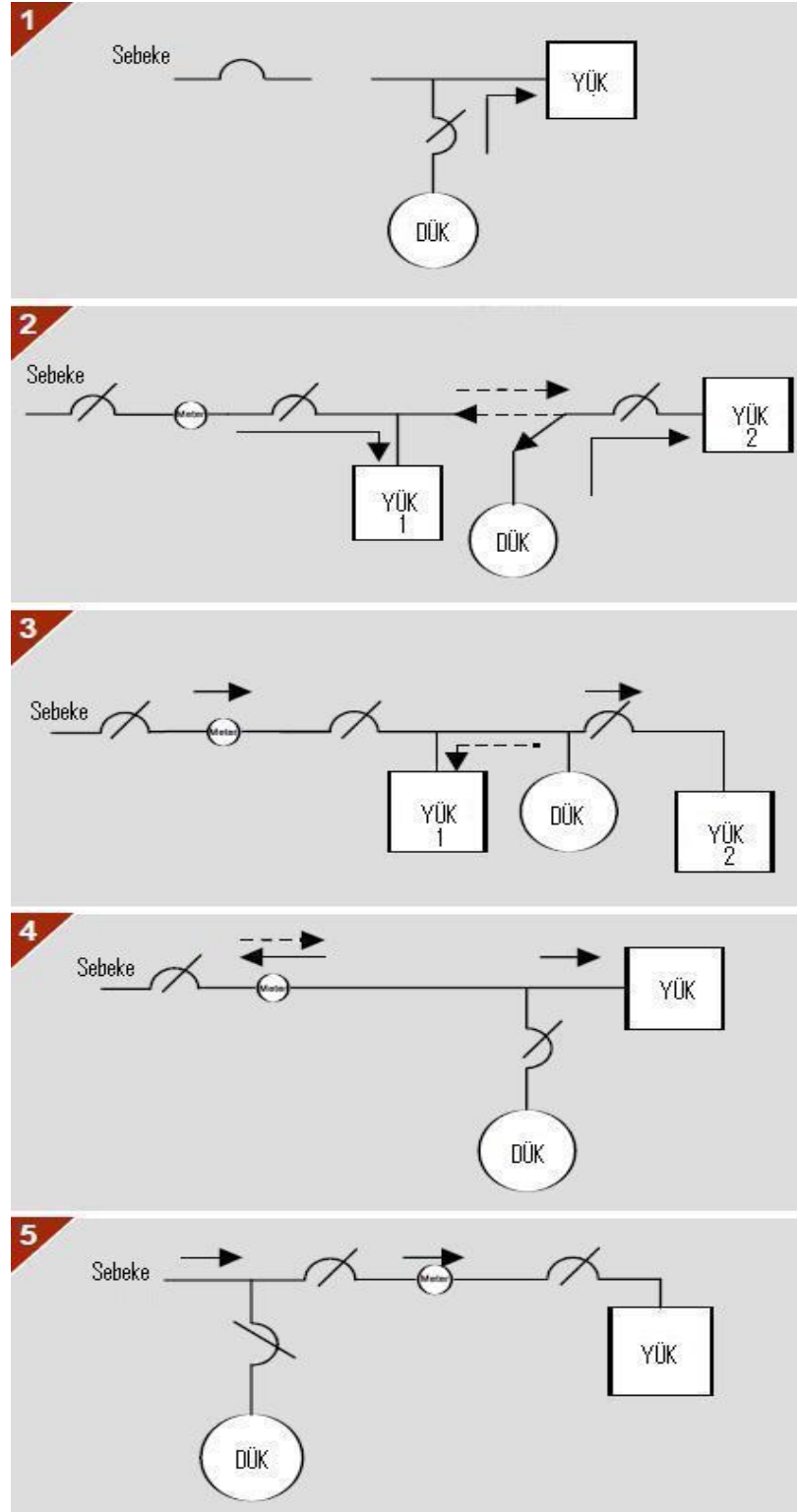
BÖLÜM 3. DAĞITILMIŞ ÜRETİMİN ETKİLERİ

Dağıtılmış üretim kaynakları bağlı buldukları dağıtım sistemleri ile birlikte;

- adası şeklinde çalışma,
- şebeke ile senkron şekilde çalışma,

olarak iki tip çalışma sergilerler. Her iki çalışma tipinde de DÜK şebekeye ve tüketicilere önemli faydalar sağlamaktadırlar.

Şekil 3.1’de dağıtılmış üretim kaynağının şebekeye bağlantı konfigürasyonları gösterilmektedir. Buna göre, birinci konfigürasyonda yük sadece DÜK tarafından beslenmektedir. Konfigürasyon 2’de DÜK, yük 2 için yedek besleme veya talebin fazla olduğu anlarda yük paylaşımı amacıyla kullanılmaktadır. Şebeke ise yük 1 ve yük 2’ye enerji sağlamaktadır. Konfigürasyon 3’te, DÜK şebeke ile senkron çalışmaktadır ancak şebekeye enerji vermemektedir. Talebin fazla olduğu anlarda gereksinimi karşılar. Konfigürasyon 4’te DÜK tüketici tarafına bağlanmıştır ve üretilen fazla enerji şebekeye geri verilebilmektedir. Konfigürasyon 5’te ise şebeke tarafına bağlanan DÜK, şebeke ile senkron çalışmaktadır [25].



Şekil 3.1: Dağıtılmış üretim kaynağı bağlantı konfigürasyonları [25]

Elektrik dağıtım sistemleri planlanırken, merkezi üretim biriminden orta ve alçak gerilim seviyesindeki yüklere doğru ve tek yönde yük akışının olacağı düşünülmüştür. Dağıtılmış üretim kaynaklarının varlığı ile aktif hale geçen dağıtım

sisteminde artık yük akışında ve yönünde değişimler görülmektedir. Aktif elektrik dağıtım sistemlerinde gerilim profili, güç kayıpları, kısa devre akımları, güç kalitesi ve güvenilirlik konularında olumlu ya da olumsuz etkiler görülmektedir. Dağıtılmış üretim kaynağının sayısı ve tipi, bağlantı noktası ve sisteme bağlantısında kullanılacak arayüzler etkinin boyutunu belirlemektedir.

3.1. Güç Kalitesi

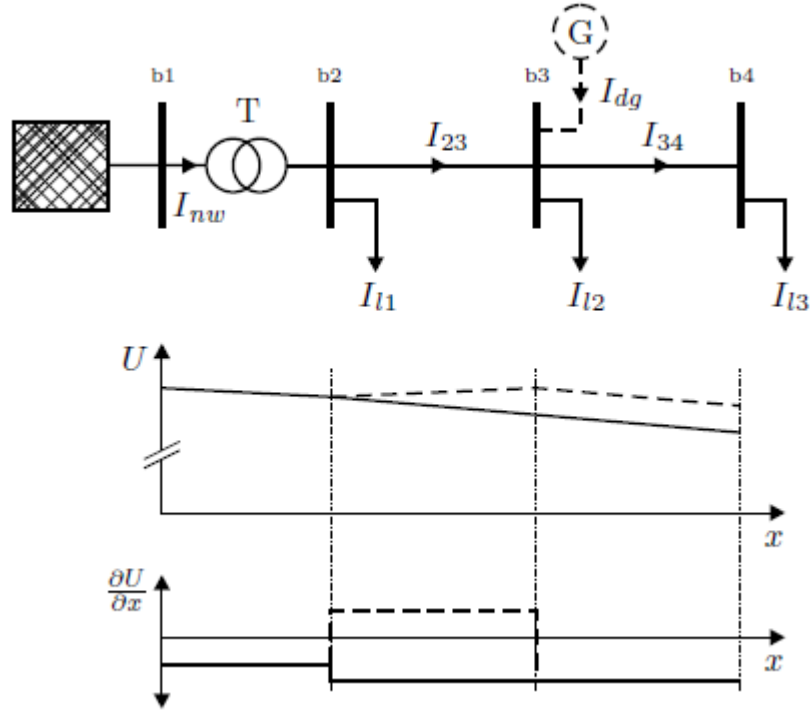
Güç elektroniği alanındaki teknolojik gelişmeler, serbest elektrik piyasası, müşteri öncelikleri ve enerji talebi konularının ortak sonucu olarak elektrik enerji endüstrisinin tercihi mevcut yapıdan dağıtılmış üretime doğru kayma eğilimi göstermektedir. Bu noktada, dağıtılmış üretimin etkileri konusunda iki soru belirlemektedir;

- Dağıtılmış üretimin güç kalitesine etkilerinin nasıl olacağı,
- Güç kalitesi sınırlarını aşmadan karşılanabilecek yük miktarı.

Standartlara göre, elektrik üreticisi sağladığı gerilimin kalitesinden sorumlu iken tüketici de sistem kapasitesine bağlı olarak neden olduğu harmonik seviyesinden sorumludur. Dolayısıyla, sisteme bağlantıda güç elektroniği tabanlı arayüzlere ihtiyaç duyan mikro türbinler, yakıt pilleri ve fotovoltaikler gibi dağıtılmış üretim kaynakları da harmonik kaynakları olarak düşünüldüklerinden sınırlı kapasite ile kullanılmaları gerekmektedir. Ancak, küçük güçlü dağıtılmış üretim birimlerinin harmonik enjeksiyonun ekonomik nedenlerden dolayı daha fazla olacağı unutulmamalıdır [11].

3.1.1. Gerilim profili

Elektrik dağıtım sistemlerine entegre edilen dağıtılmış üretim kaynaklarının gerilim profili üzerinde olumlu bir etki yarattığı görülmüştür. DÜK'ün optimal yerinin belirlenmesiyle sistem verimi, kayıplar ve gerilim profili konularında iyileşme sağlanmaktadır.



Şekil 3.2: Gerilim profili ve gradyanının değişimi [27]

Güç akışı yönü, gerilim gradyanına bağlıdır. Şekil 3.2’de dağıtılmış üretim kaynağının bir dağıtım fiderindeki etkisi gösterilmektedir. Sürekli çizgi $I_{dg} = 0$ ve kesikli çizgi ise $I_{dg} > I_{12} + I_{13}$ durumlarını ifade etmektedir. Buna göre, gerilim profilindeki iyileşmenin yanında b2 ve b3 baraları arasında değişen güç akışı yönü görülmektedir.

3.1.2. Frekans değişimi

Talep ve arz arasındaki dengesizlik sistem frekansının değişmesine sebep olacaktır. Endüstriyel tesislerde ve meskenlerde kullanılan cihazların zarar görmemesi için bu değişim dar bir aralıkta tutulmalıdır.

Dağıtılmış üretim bağlantısı frekansa da etki edecektir. Dağıtılmış üretim birimleri herhangi bir kontrol altında değildirler. Güç değerleri ve sayıları arttıkça arz-talep dengesizliğinden kaynaklanan frekans değişimlerine daha çok etki edeceklerdir.

3.2. Güvenilirlik

Bir elektrik enerji sisteminin sağlamlık göstergesi güvenilirliktir. Elektrik enerjisinin tüketiciye ulaştırılmasındaki başarı oranı güvenilirlik olarak tanımlanabilir. Bu basit tanımı genişleterek güvenilirliğin iki önemli özelliğinin olduğunu söyleyebiliriz:

- Yeterlilik: Yeterli bir memnuniyette enerji talebini karşılayabilme,
- Güvenlik: Ansızın gerçekteşen arıza veya sistem elemanlarındaki beklenilmeyen durumlara karşı varlığını sürdürebilme.

Güvenilirlik problemlerine yol açan iki temel neden olarak,

- Kapasite eksikliği,
- Aksaklık ve kısa devrelerden kaynaklanan arızalar,

gösterilebilir.

Kapasite eksikliği, talebi karşılayamayan enerji kaynağından oluşabileceği gibi, beklenmeyen bir olay karşısında yedek enerji kaynağının yetersiz kalmasından da oluşabilir. Her iki durumun ciddiyetine göre kesintiler meydana gelebilir.

Enerji sisteminde, kısa devre ve aksaklıklar sonucu oluşun arızalar sonucu meydana gelen kesintiler, kapasite eksikliğinden kaynaklanan kesintilere göre daha sık karşılaşılan durumlardır. Arızalar sonucu meydana gelen kesintilerin % 94'ü dağıtım sistemleri kaynaklı iken, geri kalan kısmı ise iletim sistemleri ve üretim birimlerindeki kesintiler oluşturmaktadır [26].

Elektrik enerji sistemlerinde güvenilirliği analiz edebilmek amacıyla, gerçekteşen kesintilere bağlı olarak bazı indisler belirlenmiştir. Bu indisler sistemdeki kesinti sıklığı, kesinti süresi ve kesintiden etkilenen müşteri (tüketici) sayısı gibi değişkenlere bağlıdır [28,29].

SAIFI : Sistem Ortalama Kesinti Sıklığı İndisi

$$SAIFI = \frac{\sum N_e}{N_k} \quad (3.1)$$

SAIDI : Sistem Ortalama Kesinti Süresi İndisi

$$SAIDI = \frac{\sum (N_e \cdot D_e)}{N_k} \quad (3.2)$$

CAIDI : Müşteri Ortalama Kesinti Süresi indisi

$$CAIDI = \frac{\sum (N_e \cdot D_e)}{\sum N_e} = \frac{SAIDI}{SAIFI} \quad (3.3)$$

Burada;

N_k : Sistemdeki müşteri (tüketici) sayısı,

N_e : Sürekli kesintiden etkilenen müşteri (tüketici sayısı),

D_e : Sürekli kesintinin süresi [dk]

olarak tanımlanmıştır.

Belirtilen güvenilirlik indisleri kullanılarak yapılan analizlerde, dağıtılmış üretim kaynağının bulunduğu noktaya ve beslediği tüketici sayısına bağlı olarak sistemin güvenilirliğini arttırdığı görülmektedir.

Dağıtılmış üretim, merkezi bir üretim yerine farklı noktalarda üretim yapmakla enerji akışındaki sürekliliği temin ederek güvenilirliği artırmaktadır. Dikkat edilmesi gereken önemli bir nokta, istenilen güvenilirlik seviyesini sağlamak için başvurulacak dağıtılmış üretimin güç akışı ve arıza durumlarına etkilerinin göz önünde bulundurulması gerekli koruma ayarlarının yapılmasıdır. Ayrıca, sistemdeki bir arıza anında otonom enerji adası şeklinde çalışma gerçekleştirildiğinde yerel güvenilirlik sağlanarak sistemin güvenilirliğine katkıda bulunmuş olmaktadır.

3.3. Koruma

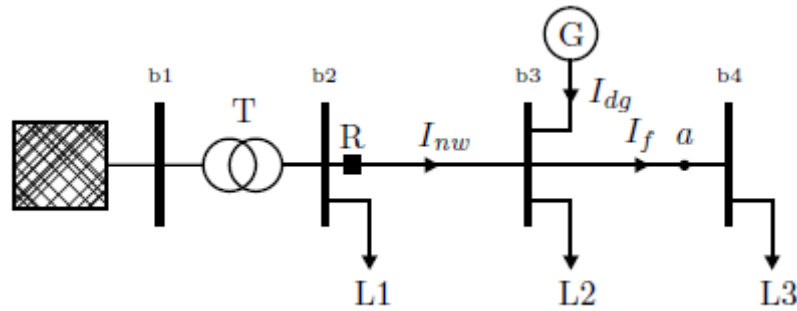
Güç sistemlerinin korunmasında hedeflenen güç sisteminin emniyetli bir şekilde çalışmasının sağlanmasıdır. Ayrıca, koruma koordinasyonu ile arıza durumlarının sisteme etkilerinin minimum seviyede tutulması sağlanmaktadır.

Elektriksel açıdan bakıldığında tehlikeli durumlar aşırı akım ve aşırı gerilim olarak belirtilebilir. Güç sistemlerinin güvenli bir şekilde işletilebilmesi için akım ve/veya gerilim gerekli sınırlar içinde tutulmalıdır. Kısa devre arızalarında aşırı akım oluşabileceği gibi yüksek toprak empedansının var olması ile de aşırı gerilim oluşabilir.

3.3.1. Kısa devre

Burada, kısa devre arızalarına karşı oluşturulan koruma koordinasyonunun sağlıklı yapılması ve dağıtılmış üretimin bu koordinasyona etkileri incelenecektir. Koruma koordinasyonu röleler vasıtasıyla gerçekleştirilmektedir. Çalışma akımları, çalışma karakteristikleri uygun seçilerek birbirleriyle koordineli çalışmaları sağlanmaktadır.

Arıza empedansı z_{th} , dağıtılmış üretimin etkisiyle küçüleceğinden daha büyük arıza akımları görülebilmektedir. Bu durum, rölelerin koordinasyonunda yeni düzenlemeler gerektirmektedir.



Şekil 3.3: a noktasındaki kısa devre durumundaki akımlar I_f , I_{dg} , I_{nw} [27]

Şekil 3.3'te a noktasındaki bir arıza durumunda oluşacak arıza akımı, G generatörünün katkısıyla $I_f = I_{dg} + I_{mw}$ olacaktır. Dolayısıyla R rölesi arıza akımının bir kısmını algılayabildiğinden doğru çalışması beklenemeyecektir.

Dağıtılmış üretim kaynağının olumsuz etkisini görebileceğimiz bir diğer durum ise b2 barasında bir kısa devre arızasıdır. R rölesinin yönlü korumaya sahip olduğu düşünüldüğünde, G generatörünün sağladığı arıza akımı R rölesinden ters yönde geçeceğinden, bu durum problem yaratacaktır.

Sonuç olarak, dağıtılmış üretim bir kısa devre arızası durumunda;

- Genlik,
- Yön,
- Süre (dolaylı olarak)

konularında etkilerini göstermektedir. Süre konusu ters zaman-akım karakteristiği durumunda karşılaşılan bir durumdur [27].

3.3.2. Ada çalışma

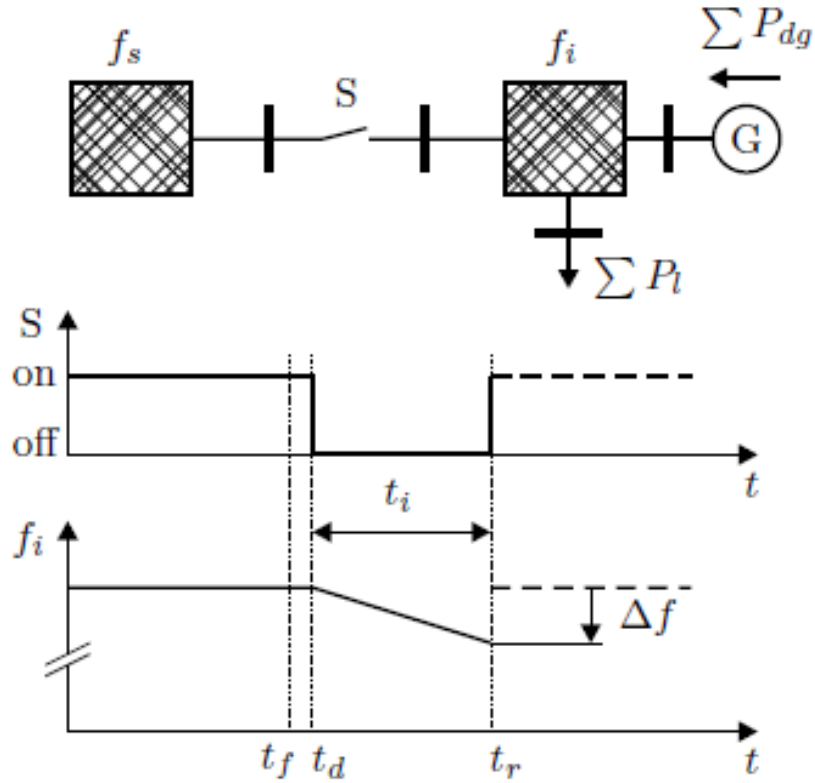
Ada çalışma, genellikle sistemde karşılaşılan bir arıza sonucunda oluşmaktadır. Bu durumda yük dengesizliğinden dolayı frekans değişimi görülebilmektedir. Arızanın temizlenmesinden sonra iki sistemin birleştirilmesi esnasında da senkronizasyon problemi oluşacaktır.

Küçük güçlü dağıtılmış üretim kaynakları gerilim kontrolörüne sahip olmadıklarından gerilim istenilen seviyelerde tutulamayabilir.

Arıza durumunda oluşan arkın dağıtılmış üretim kaynağı tarafından beslenmesi sönümü engelleyeceğinden tekrar kapama işlemi başarısız olacaktır. Dağıtılmış üretim kaynağı içeren sistemlerde ölü zaman aralığının (genel olarak $100 \text{ ms} < t_i < 1000 \text{ ms}$) genişletilmesi gerekmektedir.

Şekil 3.4'te, tekrar kapamanın gerçekleştirilmediği bir anahtarlama süreci gösterilmektedir. Ada çalışmada aktif güç eksikliği olduğundan ($\sum P_{dg} < \sum P_l$) frekansın (f_i) düştüğü görülmektedir.

Şekil 3.4'e göre, oluşan arıza akımı başlangıç zamanı t_f , anahtarın açılma zamanı t_d , tekrar kapama zaman aralığı t_i , tekrar kapama anı t_r , senkron şebeke frekansı f_s , ada bölgesinin frekansı f_i ve frekans değişimi Δf değerleri gösterilmektedir.



Şekil 3.4: Tekrar kapama süreci [27]

BÖLÜM 4. SİSTEMİN MODELLENMESİ

Bu bölümün ilk kısmında, simülasyonu yapılacak olan 13 düğümlü IEEE test fiderinin gerçekleşmesi için kullanılan DIgSILENT (DIgital SImuLation and Electrical NeTwork) Power Factory programı hakkında bilgi verilmektedir. Sonrasında, test sistemi tanıtılarak sistemdeki bileşenlerin oluşturulması ve verilerinin elde edilişi şekiller yardımıyla gösterilmektedir.

4.1. DIgSILENT Power Factory Programı

Power Factory (PF), elektrik güç sistemlerinde analiz yapmak amacıyla DIgSILENT tarafından yazılmış bilgisayar destekli bir mühendislik aracıdır. Program, elektrik güç sistemlerinde planlama ve optimizasyon simülasyonlarını başarılı bir şekilde gerçekleştirebilmek için gelişmiş yazılım paketleri ile donatılmıştır.

DIgSILENT PF yazılımı sayesinde aşağıda belirtilen birçok fonksiyon program ana penceresinden kolaylıkla kontrol edilebilmektedir;

- Bir güç sistemine ait yeni parçaların veri tabanlı veya grafiksel olarak oluşturulması,
- Tek hat şemaları çizimleri
- Elektrik güç sistemleri elemanlarının düzenlenmesi
- Tasarım seçeneklerini belirleme
- Hesaplamaların gerçekleştirilmesi
- Sonuçların rapor halinde elde edilebilmesi

Yukarıdaki fonksiyonların program ana penceresinden yürütülebilmesi, elektrik sistemleri üzerinde gerçekleştirilmesi zor ve karmaşık olan birçok analizin kontrolünü de kolaylaştırmaktadır. Bunlar yük akışı analizi, kısa devre

hesaplamaları, kararlılık analizi, harmonik hesaplamaları, mesafe ve aşırı akım-zaman koruma, optimal yük akışı analizi, güvenilirlik analizi ve dağıtım sistemleri analizleridir.

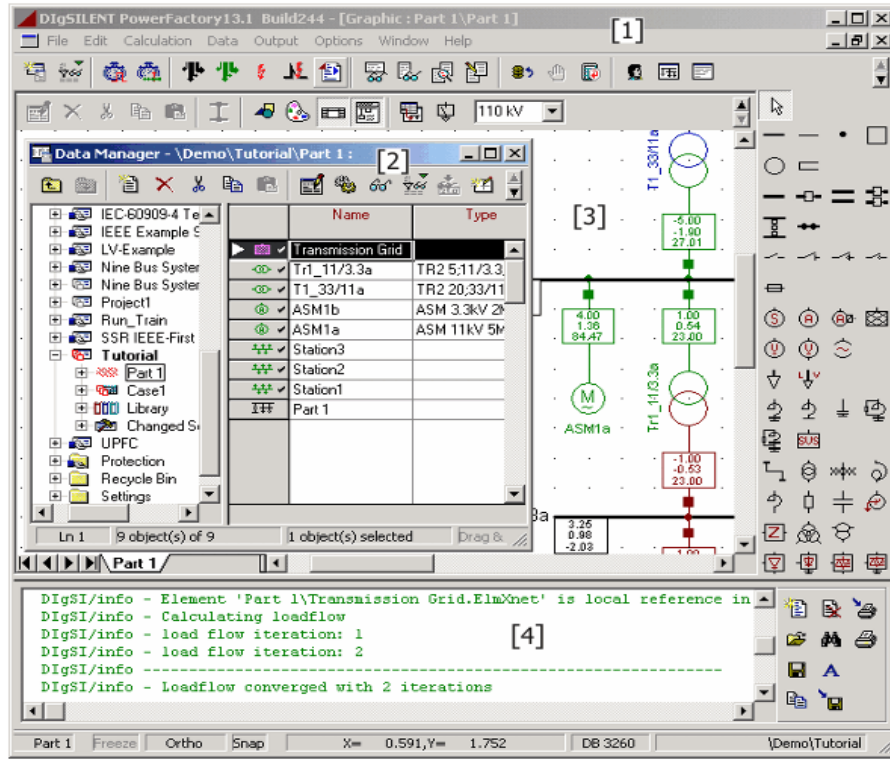
Program, bahsedilen fonksiyonları gerçekleştirirken aşağıda anlatılan çalışma prensibini kullanmaktadır;

Başlangıçta, bir proje oluşturmak amacıyla ana penceredeki grafiksel ara yüz kullanılır. Sistem burada oluşturulur ve veri girişleri de kullanılan elemanlar üzerinden gerçekleştirilir. Kullanıcının daha sonraları programa adapte olmasıyla veri girişleri “Data Manager” adındaki veri görüntüleyici aracılığıyla yapılır. Kısacası, verilere ulaşım için grafiksel birim veya “Data Manager” tercih edilir.

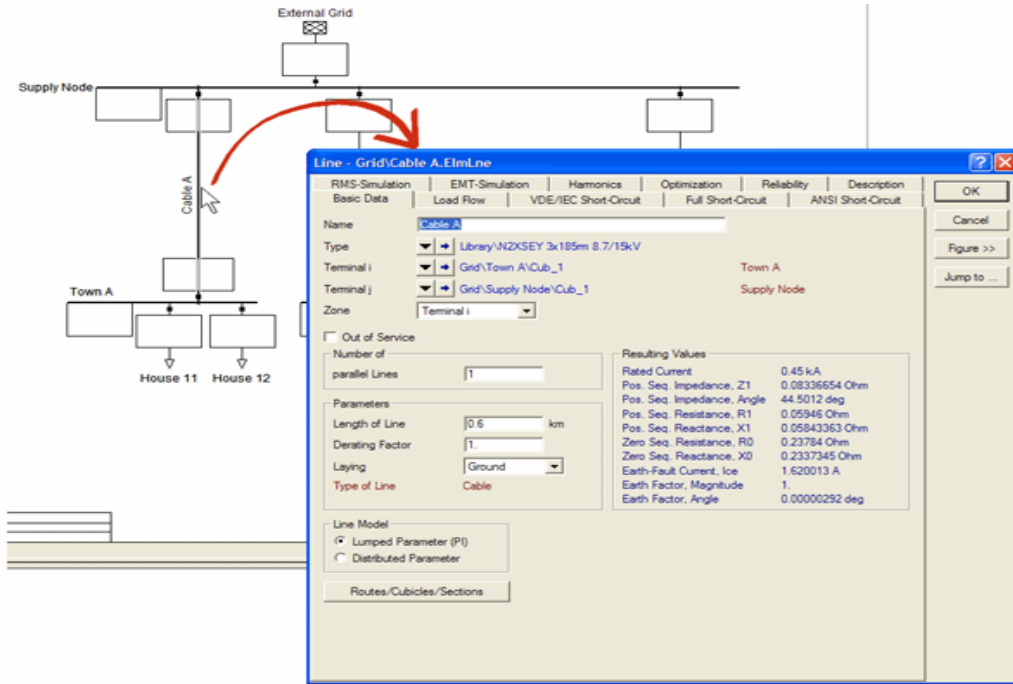
Grafiksel birimin görsel olması, takip edilebilirliği kolaylaştırdığı için kullanımı daha çok tercih edilir. Buradaki veri girişleri elemanların düzenleme menüleri sayesinde gerçekleştirilmektedir. Şekil 4.1’de Power Factory programındaki ana pencereler gösterilmektedir. Buna göre,

- 1) Ana pencere
- 2) Veri Yöneticisi penceresi
- 3) Grafik penceresi
- 4) Çıktı (sonuç) penceresidir.

Şekil 4.2’de, grafik penceresinde yer alan kabloya ait verilerin elemanın düzenleme menüsü aracılığıyla girilmesi gösterilmektedir.



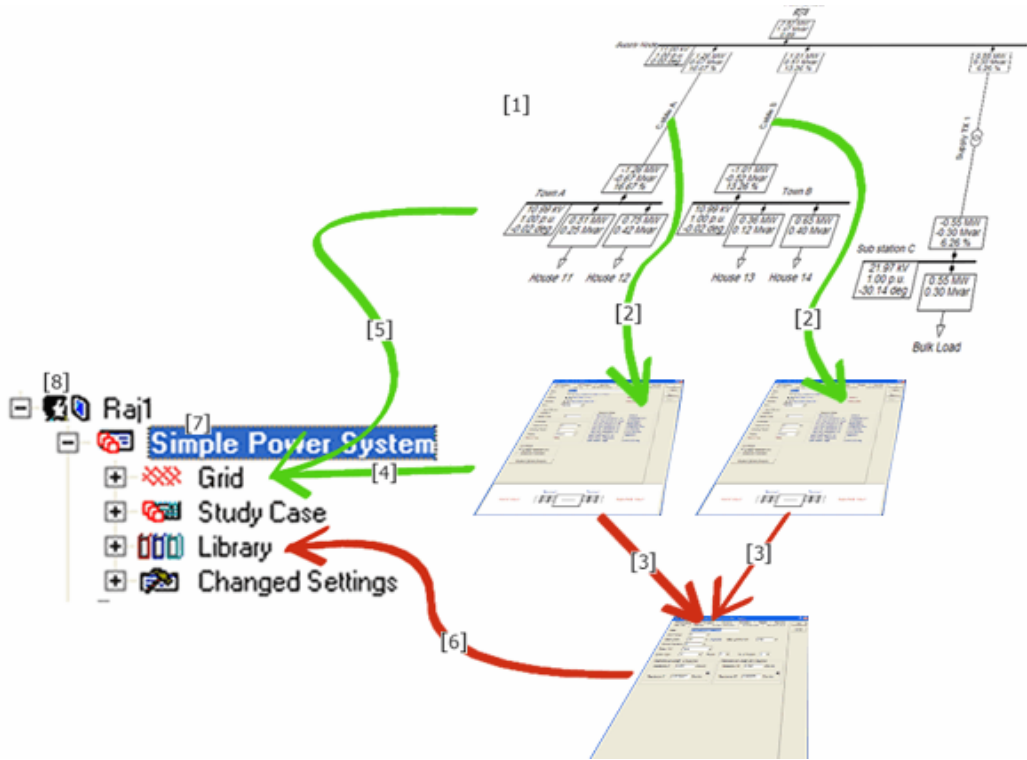
Şekil 4.1: Power Factory ana pencereleri



Şekil 4.2: Bir elemana ait verilerin düzenleme menüsü ile girilmesi

Şekil 4.3'te bir projeye ait verilerin, veri yöneticisinde depolandığı alt klasörler ve grafik penceresi görülebilmektedir. Buna göre;

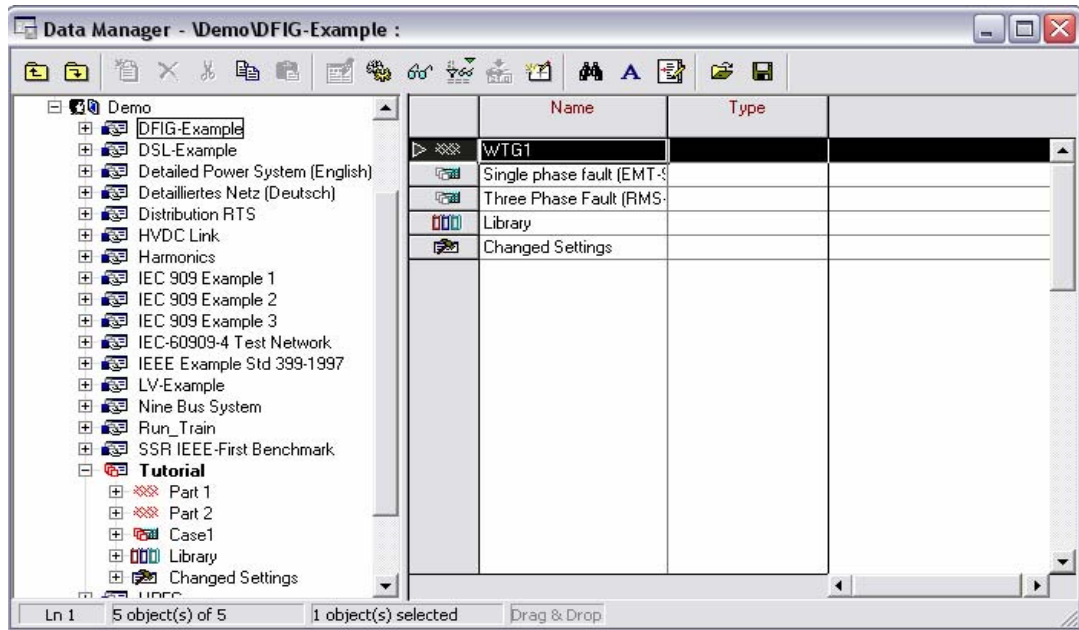
- 1) Sistemin grafiksel görünümü
- 2) Elemanlara ait düzenleme menüsü
- 3) Elemanların tiplerine ait pencereler
- 4) Grafik penceresindeki eleman verilerinin toplandığı klasör
- 5) Elemanlara ait elektriksel verilerin toplandığı klasör
- 6) Elemanların tiplerine ait verilerin toplandığı klasör
- 7) Tüm alt klasörlerin toplandığı proje klasörü
- 8) Raj1 kullanıcılarına ait tüm projelerin toplandığı klasör



Şekil 4.3: Veri yapılanması

Veri ağacında yer alan “Study Case” adlı klasör, ilgili elektriksel sistem üzerinde gerçekleştirilecek analiz ve hesaplamalara ait verileri içermektedir. Aynı zamanda sonuçların da görselleştirilmesine yardımcı olmaktadır. Bu dosya proje yapılandırılırken otomatik olarak oluşmaktadır.

Programa ait yapılan açıklamaları örnek bir elektrik güç sistemi üzerinde gerçekleştirmek amacıyla program ana penceresinden File/New alt menüsünü kullanarak yeni bir proje oluşturulur. Açılan pencerede proje ismi ve kullanıcı belirlenir. Daha sonra otomatik olarak beliren “Grid” diyalog kutusuna proje içerisinde yer alacak alt sistemlere ait isimler ve sistem frekansı girilir. “Data Manager” diyalog kutusunda ilgili kullanıcı altında oluşturulan proje “Tutorial” ve alt klasörler Şekil 4.4’te gösterilmektedir. “Study Case” klasörünün adı Edit/Study Case alt menüsü aracılığıyla “Case 1” olarak değiştirilmiştir.



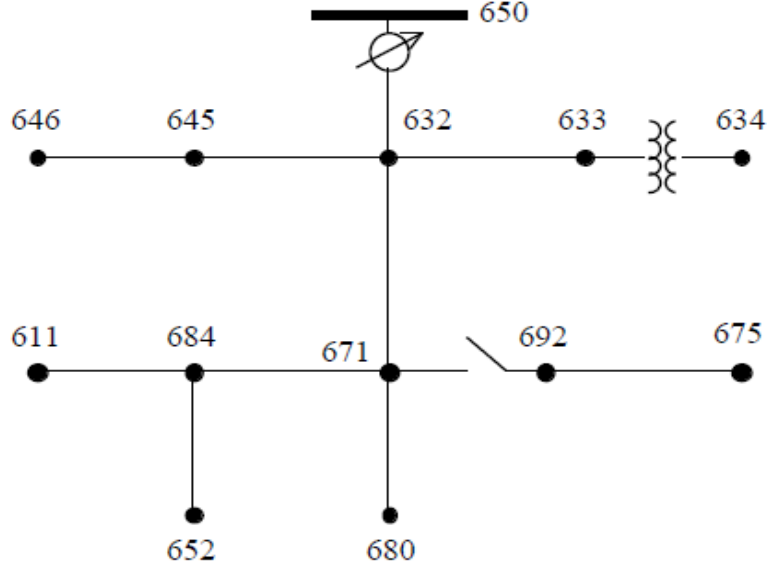
Şekil 4.4: Veri yöneticisi

Bu bölümde, güç sistemleri analiz programı olan Power Factory programının genel yapısı incelenmiştir. Veri girişlerinin nasıl yapılabileceği belirlenmiştir. Program kütüphanesinde tanımlı olan elemanlar incelenerek, yeni bir elemanın programa nasıl ekleneceği belirlenmiştir.

4.2. 13 Dügümlü IEEE Test Fideri

Simülasyonu gerçekleştirmek için seçilen 13 düğümlü IEEE test fideri, dengesiz üç fazlı radyal yapıda bir dağıtım sistemi modelidir. Sistem küçük olmasına rağmen birçok farklılığı içerisinde barındırmaktadır:

- Kısa ve yüklü 4.16 kV fider
- Havai hat ve yer altı kabloları
- Şönt kapasitörler
- Dengesiz noktasal ve yayılı yükler
- Transformatörler



Şekil 4.5: 13 düğümlü IEEE test fideri

4.2.1. Yük modelleri

Yükler, tek fazlı veya üç fazlı, noktasal veya yayılı yük olarak modellenebilmektedir. Sabit güçlü, sabit empedanslı ve sabit akımlı olmak üzere üç çeşit yük modeli oluşturulmuştur. Verilen yük değerleri faz başına değerler olup kW ve kVAr cinsinden ifade edilmektedir (Ek A).

Tablo 4.1: Yük Modellerine ait kodlar

Kod	Bağlantı	Model
Y-PQ	Yıldız	Sabit Güç
Y-I	Yıldız	Sabit Akım
Y-Z	Yıldız	Sabit Empedans
D-PQ	Üçgen	Sabit Güç
D-I	Üçgen	Sabit Akım
D-Z	Üçgen	Sabit Empedans

4.2.2. Paralel kapasitörler

Şönt kapasitörler, üç fazlı yıldız / üçgen veya tek fazlı faz arası / faz-toprak bağlı olabilir. Belirtilen değerler kVAr cinsinden olup tüm kapasitörler sabit süseptans olarak modellenmiştir. (Ek A).

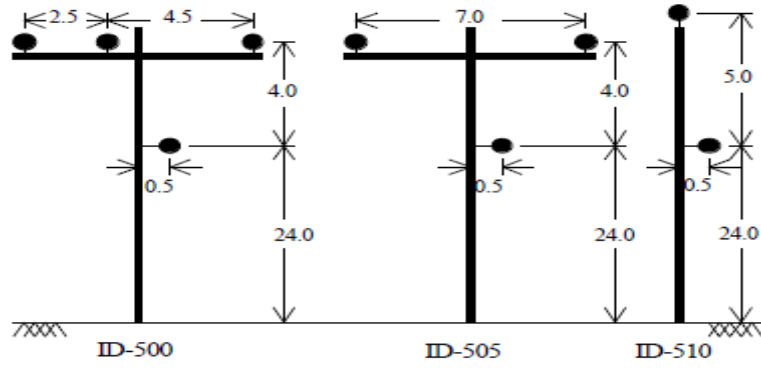
4.2.3. Havai hattın geometrik yerleşimi ve iletken verileri

Havai hat konfigürasyonlarında kullanılan iletkenlere ait karakteristik değerler Tablo 4.2'de belirtilmektedir. Havai hattın geometrik yerleşimini göstermek amacıyla Şekil 4.6 verilmektedir.

Tablo 4.2: İletken verileri

1	2	3	4	5	6
1,000	AA	0.105	1.15	0.0368	698
556,5	ACSR	0.1859	0.927	0.0313	730
500	AA	0.206	0.813	0.026	483
336.4	ACSR	0.306	0.721	0.0244	530
250	AA	0.410	0.567	0.0171	329
# 4/0	ACSR	0.592	0.563	0.00814	340
# 42/0	AA	0.769	0.414	0.0125	230
# 1/0	ACSR	1.12	0.398	0.00446	230
# 1/0	AA	0.970	0.368	0.0111	310
# 2	AA	1.54	0.292	0.00883	156
# 2	ACSR	1.69	0.316	0.00418	180
# 4	ACSR	2.55	0.257	0.00452	140
# 10	CU	5.903	0.102	0.00331	80
# 12	CU	9.375	0.081	0.00262	75
# 14	CU	14.872	0.064	0.00208	20

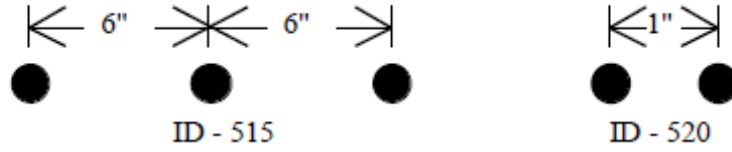
- 1- İletken kesiti (AWG veya kcmil)
- 2- İletken tipi (AA: Tam alüminyum, ACSR: çelik özlü alüminyum, CU: bakır)
- 3- 50°C' de 60 Hz' deki direnci (ohm/mil)
- 4- İletken dış çapı (inch)
- 5- GMR (ft)
- 6- Akım taşıma kapasitesi (A)



Şekil 4.6: Havai hattın geometrik yerleşimi

4.2.4. Yer altı kabloların geometrik yerleşimi ve kablo verileri:

Şekil 4.7’de yer altı kablolarına ait yerleşim gösterilmektedir. Kullanılan konsantrik nötr iletkenli kablolarla ait karakteristik değerler ise Tablo 4.3’te belirtilmektedir.



Şekil 4.7: Tam alüminyum 15 kV konsantrik nötr iletken

Tablo 4.3: Tam alüminyum 15 kV konsantrik nötr iletken verileri

1	2	3	4	5	6
2(7x)	0.78	0.85	0.98	6x14	135
1/0(19x)	0.85	0.93	1.06	6x14	175
2/0(19x)	0.90	0.97	1.10	7x14	200
250(37x)	1.06	1.16	1.29	13x14	260
500(37x)	1.29	1.39	1.56	16x12	385
1000(61x)	1.64	1.77	1.98	20x10	550

- 1- İletken kesiti (AWG veya kcmil)
- 2- İzolasyon üzerinden ölçülen çap (inch)
- 3- Ekranlama üzerinden ölçülen çap (inch)
- 4- Dış çap (inch)
- 5- Nötr iletken (No x AWG)
- 6- 4 inch’lik kanaldaki akım taşıma kapasitesi

15 kV tam alüminyum bantlı kabloya ait veriler Tablo 4.4’de belirtilmektedir.

Tablo 4.4: 15 kV tam alüminyum bantlı kablo

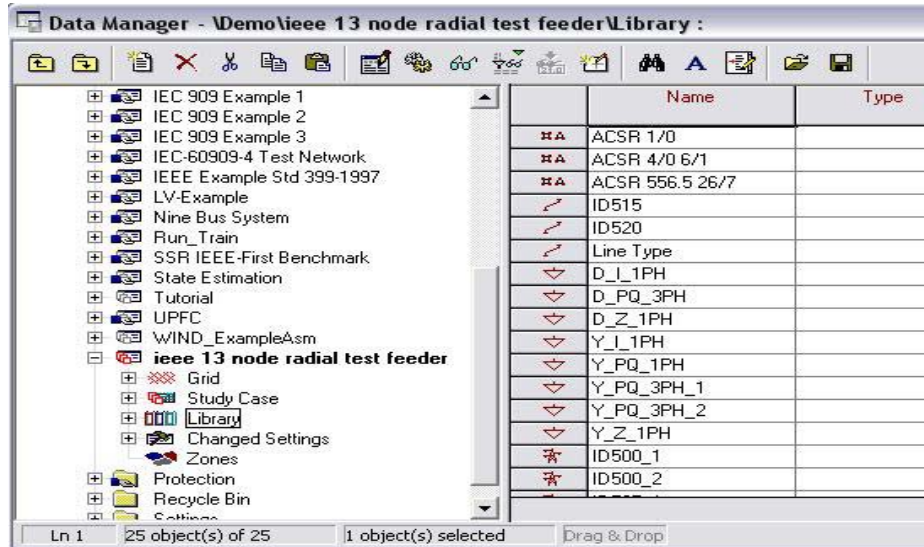
1	2	3	4	5	6
1/0	0.82	0.88	80	1.06	165

- 1- İletken kesiti (AWG)
- 2- İzolasyon üzerinden ölçülen çap (inch)
- 3- Bant üzerinden ölçülen çap (inch)
- 4- Kabuk kalınlığı (mils)
- 5- Dış çap (inch)
- 6- 4 inch’lik kanaldaki akım taşıma kapasitesi

Kullanılacak havai hat iletkenleri ve yer altı kablolarına ait konfigürasyonların faz sırası, uzunlukları, geometrik yerleşimi ve bağlı oldukları düğümler ile yüklere, şönt kapasitörlere ve transformatörlere ait sayısal büyüklükler Ek A’da sunulmaktadır.

4.3. PF ile 13 Düğümlü IEEE Test Fiderinin Modellenmesi

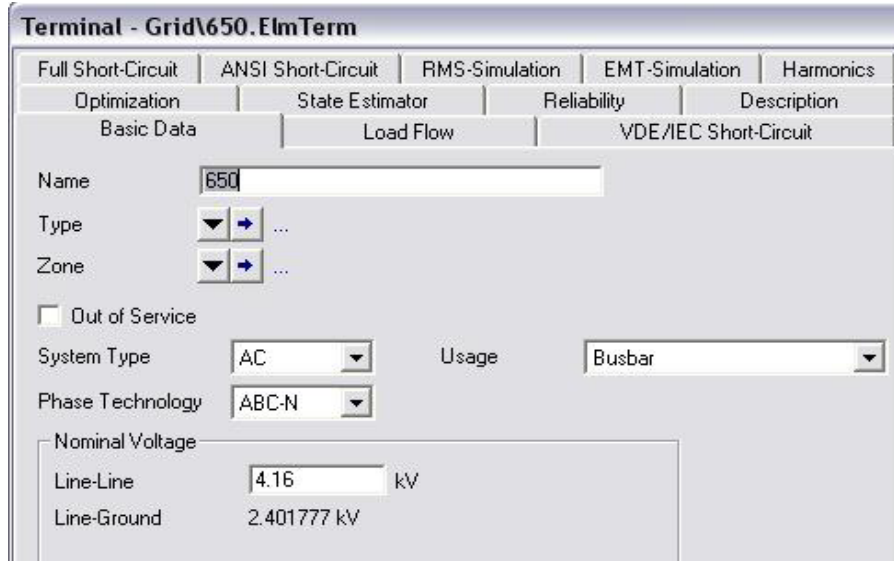
Oluşturulan ‘ieee 13 node radial test feeder’ adlı projenin içerisinde yer alan ‘Library’ klasöründe sistemdeki tüm elemanların listesi ve bu elemanlara ait veri girişleri muhafaza edilmektedir. Sistemdeki elemanlar, program bünyesinde var olan kütüphaneden temin edilebileceği gibi kullanıcı tarafından da oluşturulabilmektedir. Şekil 4.8’de Veri Yöneticisi aracılığıyla projeye ait alt dosyalar ve ‘Library’ klasöründeki elemanlar görülebilmektedir.



Şekil 4.8: Bir projenin görüntülenmesi

4.3.1. Elemanların modellenmesi

Bu bölümde 13 düğümlü IEEE test fiderini modellemek amacıyla kullanılan elemanların veri girişlerinin nasıl gerçekleştirildiği gösterilecektir. Bu amaçla ‘Grid’ adlı grafik penceresinde çok uçlu elemanlarımızı bağlayacağımız terminaller oluşturulur.



Şekil 4.9: Terminal veri girişi penceresi

Gerekli tüm terminaller oluşturulduktan sonra Bölüm 4.2 ve Ek A’daki sistem elemanlarına ait veriler doğrultusunda elemanların modellenmesi gerçekleştirilir. İlk olarak, kaynak oluşturulmuş, daha sonra hatlar ve kablolar ile transformatörler yerleştirilmiştir.

Grafik penceresinde hat ve kablo veri girişlerini tamamlamak için kullanılan iletkenlerin karakteristik değerleri ile geometrik yerleşimleri ‘Library’ klasörü altında oluşturulmadır.

ACSR 556.5 26/7 çelik özlü alüminyum iletken için veri girişi ve geometrik yerleşimine ait veri girişleri pencereleri ve sonuçta elde edilen elektriksel değerler Şekil 4.10-12’de verilen pencerelerde gösterilmektedir.

Conductor Type - Library\ACSR 556.5 26/7.TypCon

Full Short-Circuit	ANSI Short-Circuit	RMS-Simulation	EMT-Simulation
Harmonics	Optimization	State Estimator	Reliability
Basic Data		Load Flow	VDE/IEC Short-Circuit

Name:

Nominal Voltage: kV

Nominal Current: kA

Number of Subconductors:

(Sub-)Conductor:

DC-Resistance: Ohm/kit

Diameter: in

GMR (Equivalent Radius): in

Skin effect

Şekil 4.10: İletken karakteristiklerine ait veri girişleri

Tower Type - Library\TD500_1.TypTow

RMS-Simulation	EMT-Simulation	Harmonics	Optimization	State Estimator	Reliability	Description
Basic Data		Load Flow	VDE/IEC Short-Circuit	Full Short-Circuit	ANSI Short-Circuit	

Coordinate of Earth Conductors [ft]:

	X	Y
▶ Earth Conductor 1	0.5	24.

Coordinate of Line Circuits [ft]:

	X1	X2	X3	Y1	Y2	Y3
▶ Circuit 1	-4.5	-7.	0.	28.	28.	28.

Şekil 4.11: İletkenlerin geometrik yerleşim verilerinin girilmesi

Line - Grid\601_1.ElmLne

RMS-Simulation	EMT-Simulation	Harmonics	Optimization	State Estimator	Reliability	Description
Basic Data	Load Flow	VDE/IEC Short-Circuit	Full Short-Circuit	ANSI Short-Circuit		

Name: 601_1

Type: Library\ID500_1

Terminal i: Grid\650\Cub_4 650

Terminal j: Grid\632\Cub_1 632

Zone: Terminal i

Out of Service

Number of parallel Lines: 1

Parameters:

Length of Line: 2000. ft

Derating Factor: 1.

Type of Line: Tower Type

Line Model:

Lumped Parameter (PI)

Distributed Parameter

Routes/Cubicles/Sections

Resulting Values:

Rated Current	0.73 kA
Pos. Seq. Impedance, Z1	0.2365789 Ohm
Pos. Seq. Impedance, Angle	72.52555 deg
Pos. Seq. Resistance, R1	0.07104004 Ohm
Pos. Seq. Reactance, X1	0.225661 Ohm
Zero Seq. Resistance, R0	0.2421718 Ohm
Zero Seq. Reactance, X0	0.748134 Ohm
Earth-Fault Current, Ice	0.00876005 A
Earth Factor, Magnitude	0.7746329
Earth Factor, Angle	-0.6613346 deg

Şekil 4.12: İletkene ait elektriksel değerlerin elde edilmesi

Şekil 4.13'te elde edilen dizi bileşen değerlerinin hesaplanmasında kullanılan yöntem Ek B'de gösterilmektedir.

Line Type - Library\ID515.TypLne

RMS-Simulation	EMT-Simulation	Harmonics	Optimization	State Estimator	Reliability	Description
Basic Data	Load Flow	VDE/IEC Short-Circuit	Full Short-Circuit	ANSI Short-Circuit		

Name: ID515

Rated Voltage: 15. kV

Rated Current: 0.26 kA

Nominal Frequency: 60. Hz

Cable / OHL: Non-armoured Cable

System Type: AC Phases: 3 No. of Neutrals: 0

Parameters per Length 1,2-Sequence:

Resistance R': 0.0923106 Ohm/kit

Reactance X': 0.07861701 Ohm/kit

Parameters per Length Zero Sequence:

Resistance R0': 0.26714 Ohm/kit

Reactance X0': 0.08835201 Ohm/kit

Şekil 4.13: Yer altı kablosuna ait verilerin girilmesi

Ek A’da yer alan transformatör verileri kullanılarak Sub_Station adlı transformatörün veri girişleri ise Şekil 4.14 ve Şekil 4.15’te gösterildiği gibi grafik penceresinden ve kullanıcı tarafından oluşturulan kütüphaneden seçilerek tamamlanmıştır.

Şekil 4.14: Transformatör veri girişi

Şekil 4.15: Projede oluşturulan transformatöre ait verilerin girilmesi

Bölüm 4.2.1’de belirtildiği gibi yük modellerinin belirlenmesi amacıyla kpu ve kqu parametreleri tanımlanmıştır. Buna göre;

$$P = P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{kpu} \quad (4.1)$$

$$Q = Q_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{kqu} \quad (4.2)$$

Yük modelinin sabit güçlü, sabit empedanslı veya sabit akımlı olduğu Tablo 4.5’te verildiği gibi kpu/kqu oranına göre belirlenmektedir.

Tablo 4.5: Yük modelinin belirlenmesi

kpu/kqu	Yük modeli
0	Sabit güç
1	Sabit akım
2	Sabit empedans

General Load - GridV1.ElmLod

Full Short-Circuit | ANSI Short-Circuit | RMS-Simulation | EMT-Simulation | Harmonics

Optimization | State Estimator | Reliability | Description

Basic Data | Load Flow | VDE/IEC Short-Circuit

Input Mode: ...

Balanced/Unbalanced:

Operating Point Actual Values

Active Power: MW 0.4 MW

Reactive Power: Mvar 0.29 Mvar

Voltage: p.u.

Scaling Factor: 1.

Adjusted by Feeder Load Scaling Zone Scaling Factor: 1.

Phase 1 Actual Values

Active Power: MW 0.12 MW

Reactive Power: Mvar 0.09 Mvar

Phase 2 Actual Values

Active Power: MW 0.16 MW

Reactive Power: Mvar 0.11 Mvar

Phase 3 Actual Values

Active Power: MW 0.12 MW

Reactive Power: Mvar 0.09 Mvar

Şekil 4.16: Yük verilerinin girilmesi

4.4. Asenkron Generatörlü Rüzgar Türbini Modeli

Power Factory programında benzetim modeli oluşturulan asenkron generatörlü rüzgar türbini için gerekli matematiksel ifadeler denklem (4.3)'ten yola çıkarak elde edilmektedir.

Rüzgarın kinetik enerjisi; m:havanın kütlesi (kg) ve v_w : rüzgar hızı (m/s) olmak üzere,

$$E_k = \frac{1}{2}mv_w^2 \quad (4.3)$$

olarak tanımlanmaktadır.

ρ : hava yoğunluğu (kg/m^3), A: kanat tarama alanı (m^2) olmak üzere hava akışının;

$$q = \rho v_w A \quad (4.4)$$

olarak tanımlandığı denklemde kinetik enerjinin zamana göre türevi havanın aerodinamik gücünü (P_w) vermektedir.

$$P_w = \frac{\partial E_k}{\partial t} = \frac{1}{2} \frac{\partial m}{\partial t} v_w^2 = \frac{1}{2} q v_w^2 \quad (4.5)$$

Rüzgar türbinleri toplam kinetik enerjinin aerodinamik faktörü (C_p) uyarınca belirli bir kısmını generatör şaftına iletebilmektedir. Rüzgar hızına, rotor hızına, kanat açısına ve türbin tasarımına bağlı olarak değişen C_p faktörü farklı türbin modelleri için kanat açısına (θ) ve uç hızı oranına (λ) bağlı olarak değişmektedir. Uç hızı oranı ise türbin hızının rüzgar hızına oranlanmasıyla elde edilmektedir. R: kanat yarıçapı olmak üzere,

$$\lambda = \frac{v_{tur}}{v_w} = \frac{\omega_{tur} R}{v_w} \quad (4.6)$$

Bu bilgiler ışığında rüzgar türbininden elde edilecek mekaniksel güç aşağıda tanımlanmaktadır.

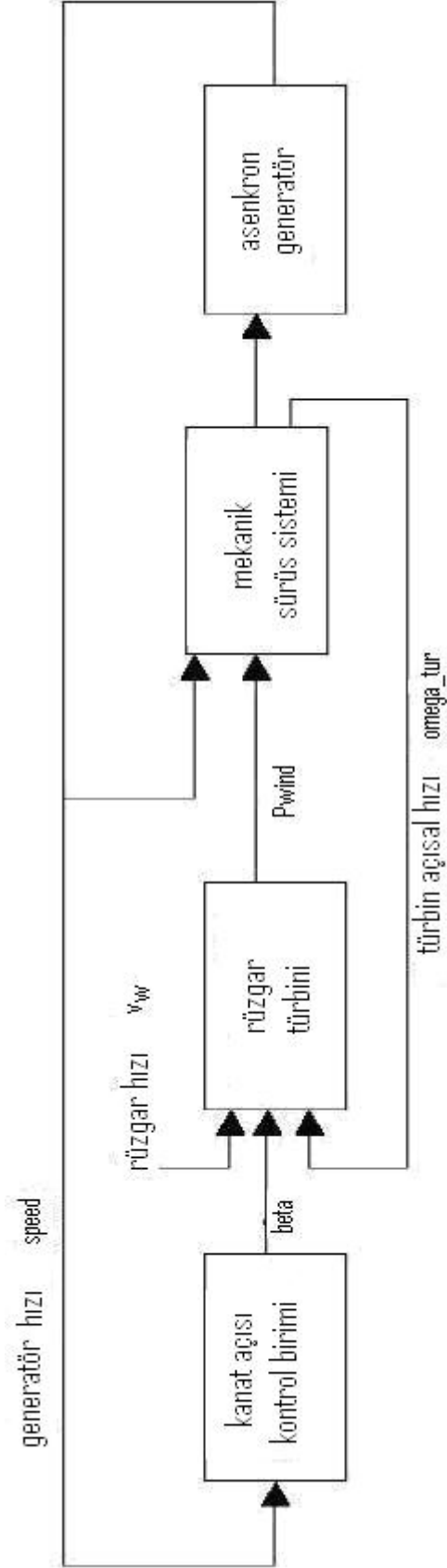
$$P_w = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v_w^3 C_p(\lambda, \theta) \quad (4.7)$$

Türbin gücünün oluşturacağı aerodinamik moment ise;

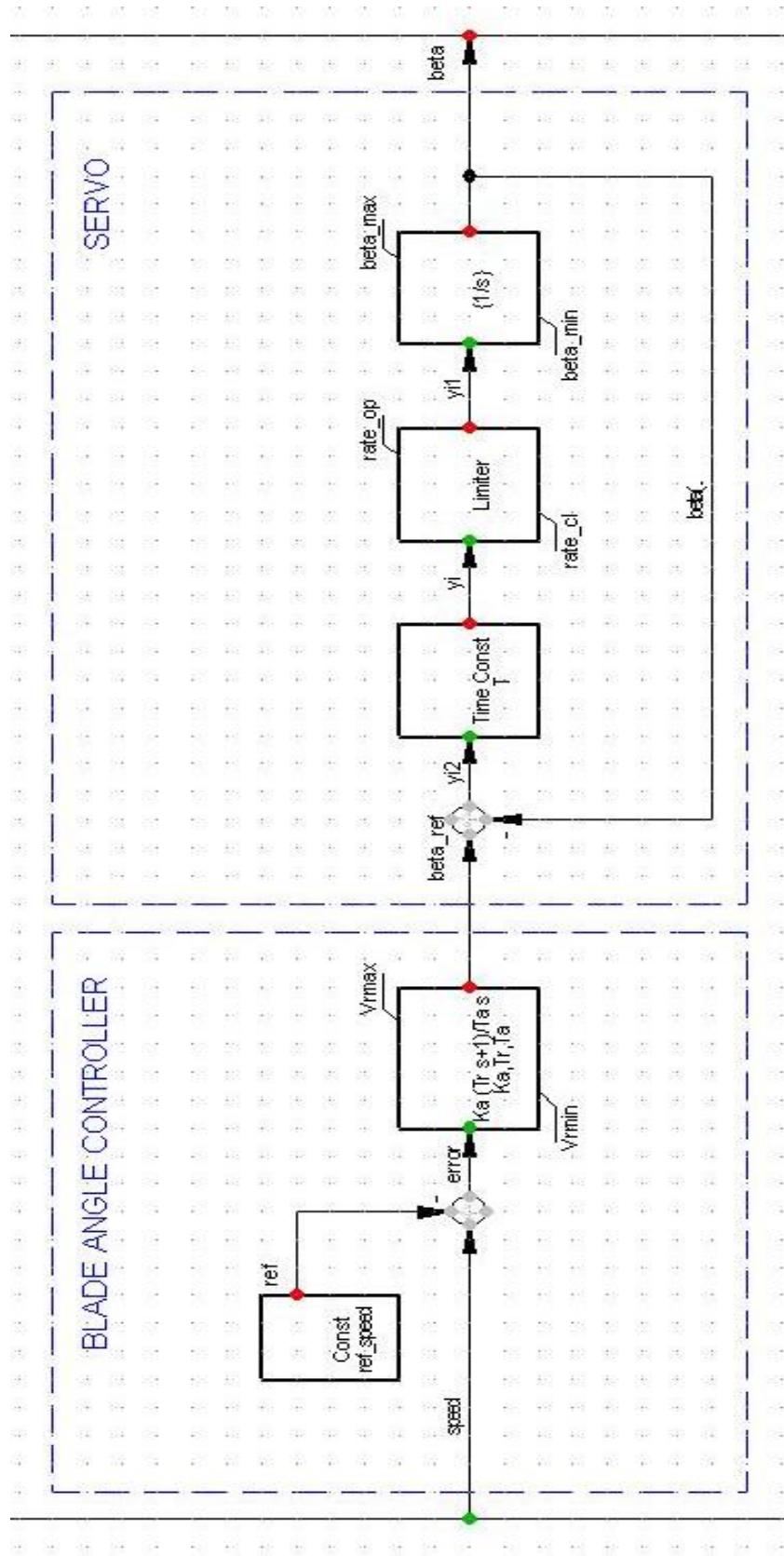
$$T_w = \frac{P_w R}{v_w \lambda} = \frac{1}{2\lambda} \rho \pi R^3 v_w^2 C_p(\lambda, \theta) \quad (4.8)$$

olarak tanımlanmaktadır [30].

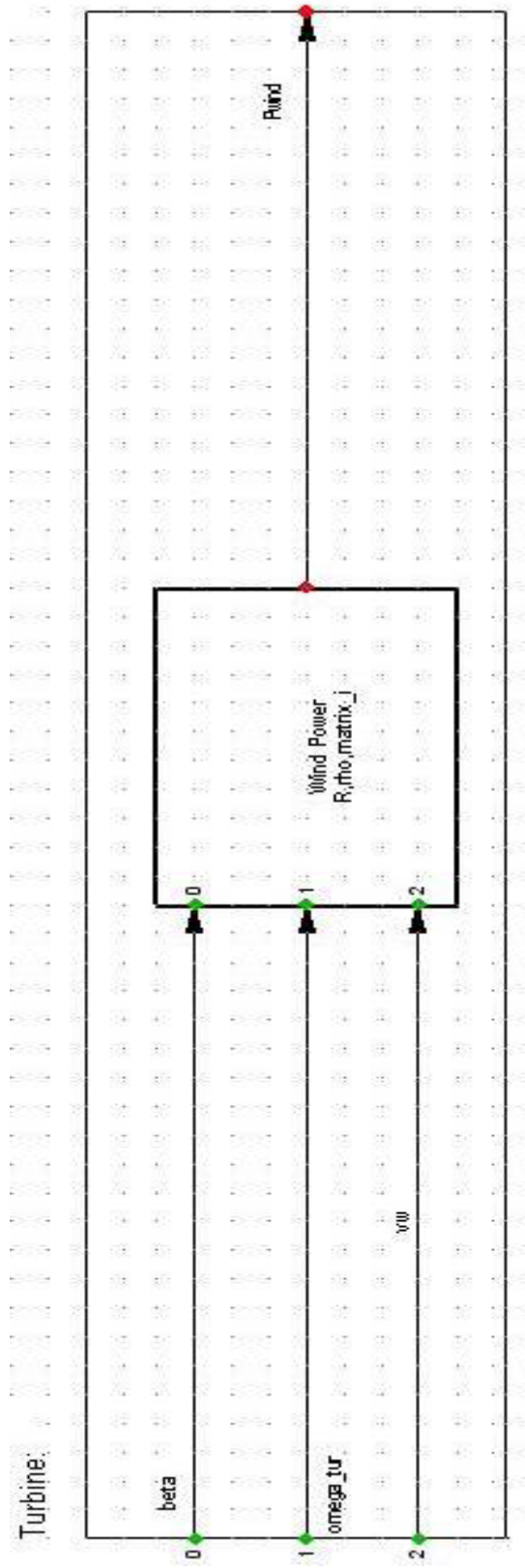
Kanat açısı kontrol birimi, türbin ve mekanik sürüş sisteminin meydana getirdiği tahrik kısmı (Prime Mover) ile asenkron generatör Şekil 4.17'de gösterilmektedir. Tahrik kısmı bileşenlerine ait blok diyagramlar Şekil 4.18-20'de ayrıca gösterilmektedir.



Şekil 4.17: Asenkron generatörlü rüzgar türbini bileşenleri

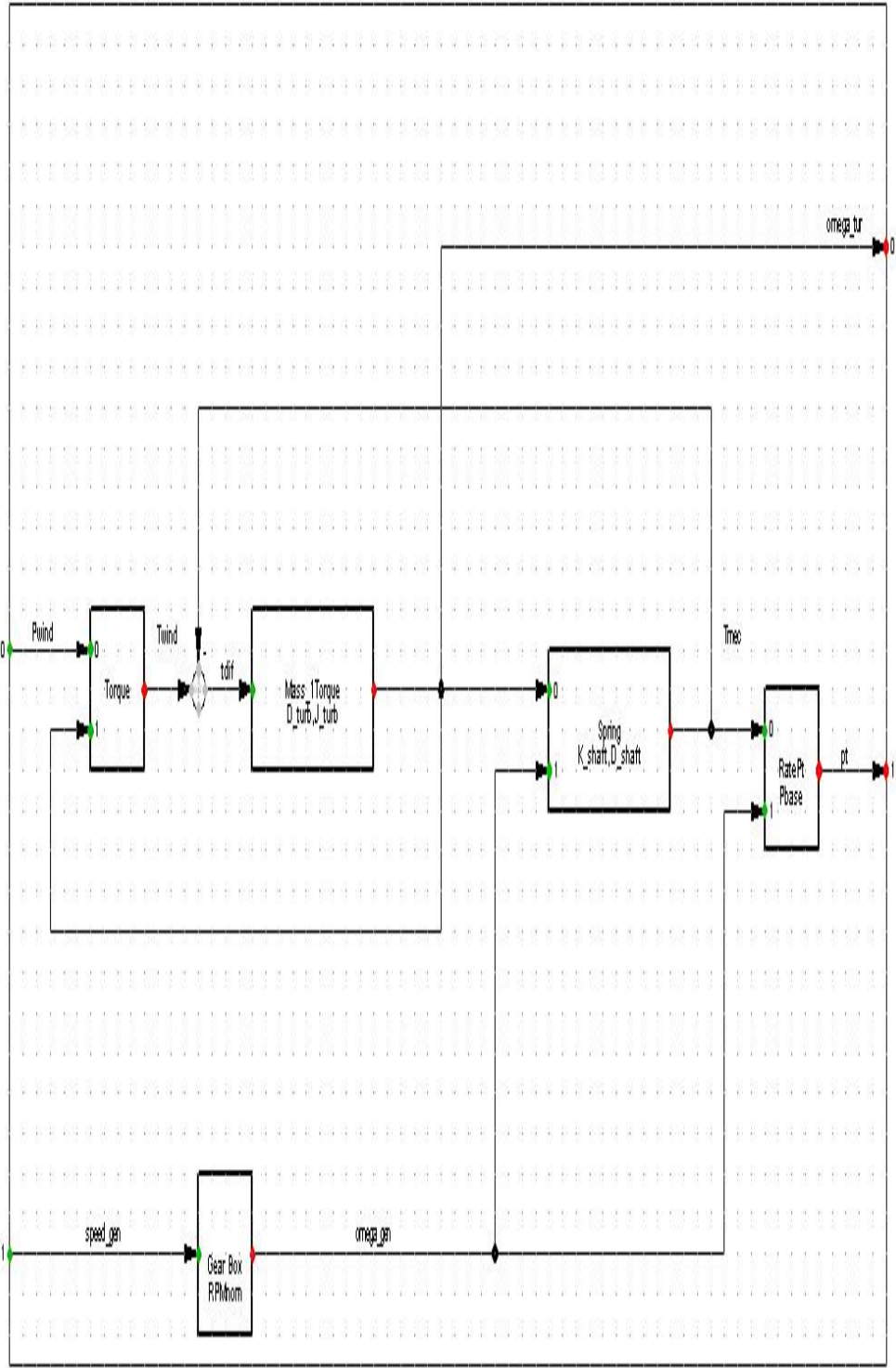


Şekil 4.18: Kanat açısı kontrol birimi blok diyagramı



Şekil 4.19: Türbin blok diyagramı

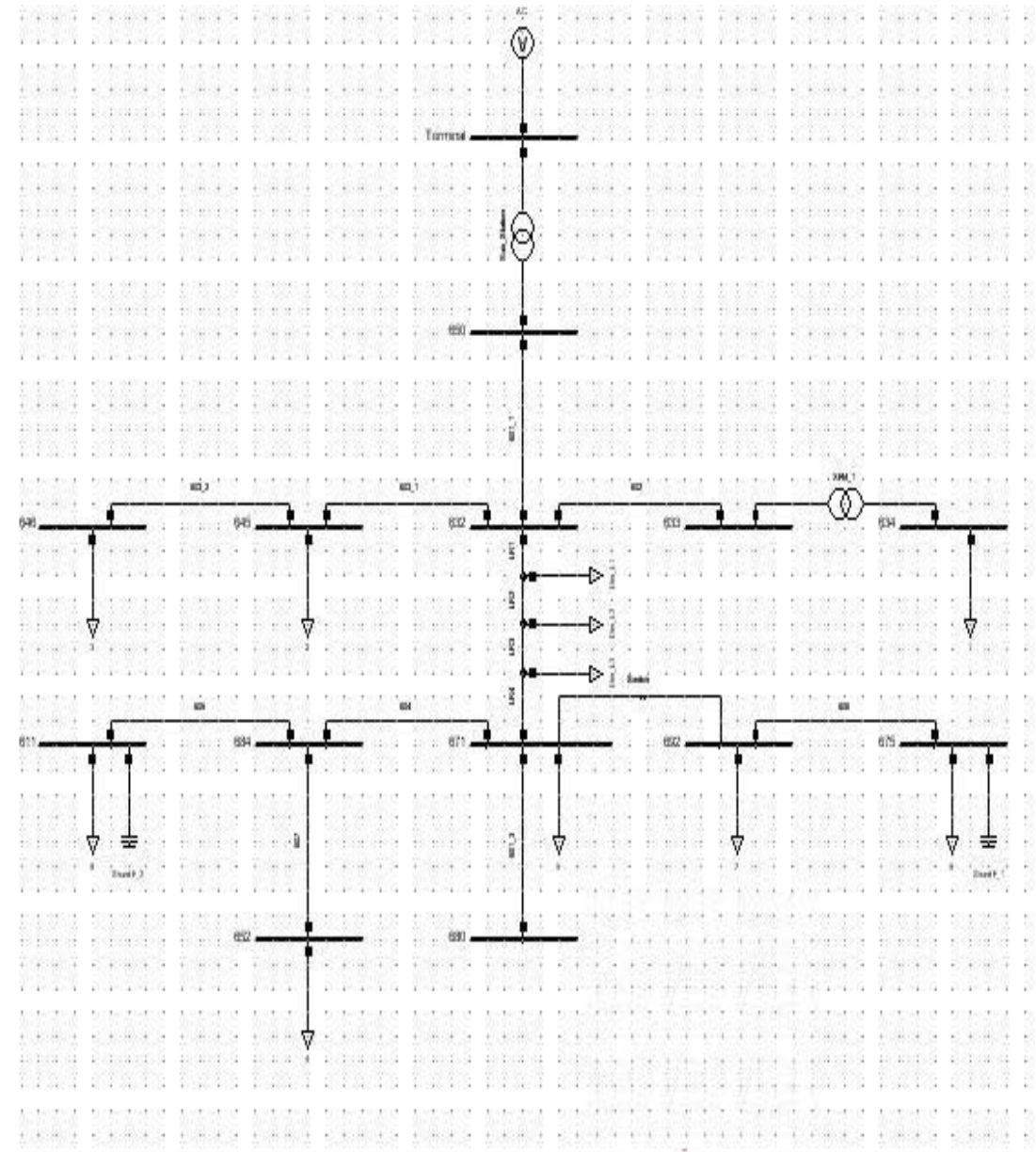
Shaft Model:



Şekil 4.20: Şaft (mekanik sürüş) blok diyagramı

BÖLÜM 5. ANALİZ SONUÇLARI

Bu bölümde, dağıtılmış üretim kaynaklarının dengesiz üç fazlı 13 düğümlü IEEE test fideri üzerindeki etkilerini göstermek amacı ile sürekli durum yük akışı ve kısa devre analizi sonuçları verilecektir. Bölüm 4.3'te modellenmesi verilen test fiderinin PF'de kurulan tek hat şeması Şekil 5.1'de gösterilmiştir.



Şekil 5.1: PF'de oluşturulmuş 13 düğümlü IEEE test fiderine ait tek hat şeması

Dağıtılmış üretim kaynağının sürekli durumdaki etkilerini belirlemek amacıyla gerçekleştirilen analizlerde (yük akışı ve kısa devre) üç durum göz önünde bulundurulmuştur. Bunlar;

- Sistemde dağıtılmış üretim kaynağı yok
- Belirlenen bir düğüme 2 MW'lık asenkron generatörlü rüzgar türbini bağlı
- İkinci durumdaki rüzgar türbini gücü 1.5 MW seçilerek 634 nolu düğüme 0.5 MW'lık senkron generatör bağlı.

Tablo 5.1'de, yük akışı analizi sonuçları, 671 nolu düğüme 2 MW gücündeki rüzgar türbini bağlanarak yapılan yük akışı analizi sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Toplamda 2 MW olan dağıtılmış üretim kaynağı gücü, 671 nolu düğümden 1.5 MW rüzgar türbini ve 634 nolu düğümden 0.5 MW senkron generatör olacak şekilde dağıtılarak yük akışı analizi tekrarlanmıştır. Aynı tabloda, asenkron generatörlü rüzgar türbininin bağlantı noktası 680 nolu düğüm olarak değiştirildiğinde elde edilen sonuçlar karşılaştırma amacıyla sunulmuştur.

Tablo 5.1'deki veriler incelendiğinde, düğüm gerilimlerinin dağıtılmış üretim kaynağının etkisiyle yükseldiği görülmektedir. Aynı büyüklükteki dağıtılmış üretim kaynağının bağlantı noktasına göre gerilime olan etkisinin de değiştiği görülebilmektedir. Toplam güç miktarı değiştirilmeden uygulanan dağıtılmış üretim kaynaklarının, sistem gerilim profilinde, aynı gücün tek noktadan uygulanması ile elde edilen sonuçlardan daha iyi bir etki yarattığı sonucuna varılmaktadır.

Tablo 5.1: Yük akışı sonuçları

Düğüm	Faz	Düğüm Gerilimleri [p.u]				
			671	671 ve 634	680	680 ve 634
		DÜK 0	DÜK 2MW	DÜK 1.5+0.5 MW	DÜK 2 MW	DÜK 1.5+0.5 MW
650	A	0.979	0.985	0.990	0.985	0.989
	B	0.966	0.975	0.982	0.975	0.982
	C	0.955	0.969	0.975	0.968	0.975
Terminal	A	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	B	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	C	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
632	A	0.965	0.985	0.989	0.984	0.989
	B	0.929	0.944	0.959	0.944	0.959
	C	0.905	0.937	0.950	0.936	0.949
645	A	---	---	---	---	---
	B	0.926	0.941	0.956	0.941	0.956
	C	0.894	0.927	0.939	0.926	0.939
646	A	---	---	---	---	---
	B	0.924	0.940	0.955	0.939	0.955
	C	0.893	0.925	0.938	0.924	0.937
633	A	0.962	0.982	0.987	0.982	0.987
	B	0.925	0.941	0.958	0.940	0.958
	C	0.902	0.935	0.950	0.934	0.949
634	A	0.942	0.963	0.979	0.962	0.978
	B	0.899	0.915	0.952	0.914	0.952
	C	0.881	0.915	0.949	0.913	0.948
671	A	0.952	0.985	0.989	0.984	0.989
	B	0.901	0.921	0.939	0.921	0.939
	C	0.885	0.934	0.946	0.932	0.945
684	A	0.950	0.983	0.987	0.983	0.987
	B	---	---	---	---	---
	C	0.883	0.932	0.944	0.930	0.943
611	A	---	---	---	---	---
	B	---	---	---	---	---
	C	0.881	0.929	0.942	0.928	0.941
675	A	0.953	0.986	0.990	0.986	0.989
	B	0.895	0.915	0.933	0.915	0.939
	C	0.881	0.930	0.942	0.928	0.945
652	A	0.944	0.978	0.982	0.977	0.981
	B	---	---	---	---	---
	C	---	---	---	---	---
680	A	0.952	0.985	0.989	0.991	0.996
	B	0.901	0.921	0.939	0.923	0.942
	C	0.885	0.934	0.946	0.939	0.952
Terminal(1)	A	---	0.964	0.974	0.967	0.978
	B	---	0.937	0.951	0.941	0.956
	C	---	0.941	0.952	0.946	0.958

Dengesiz, radyal yapıdaki 13 düğümlü IEEE test fiderinde kısa devre akımlarındaki değişimleri belirlemek amacıyla yukarıda bahsedilen durumlar için üç faz-toprak ve bir faz-toprak kısa devreleri gerçekleştirilmiştir. Tablo 5.2’de verilen kısa devre akımları, her bir düğümde oluşturulan arıza durumundaki sonuçlardır. Buna göre, dağıtılmış üretim kaynağı varlığının, arıza akımlarının artmasına neden olduğu görülmektedir. Birden fazla dağıtılmış üretim kaynağının ise arıza akımına olan etkisinin daha fazla olduğu analizler sonucu belirlenmiştir.

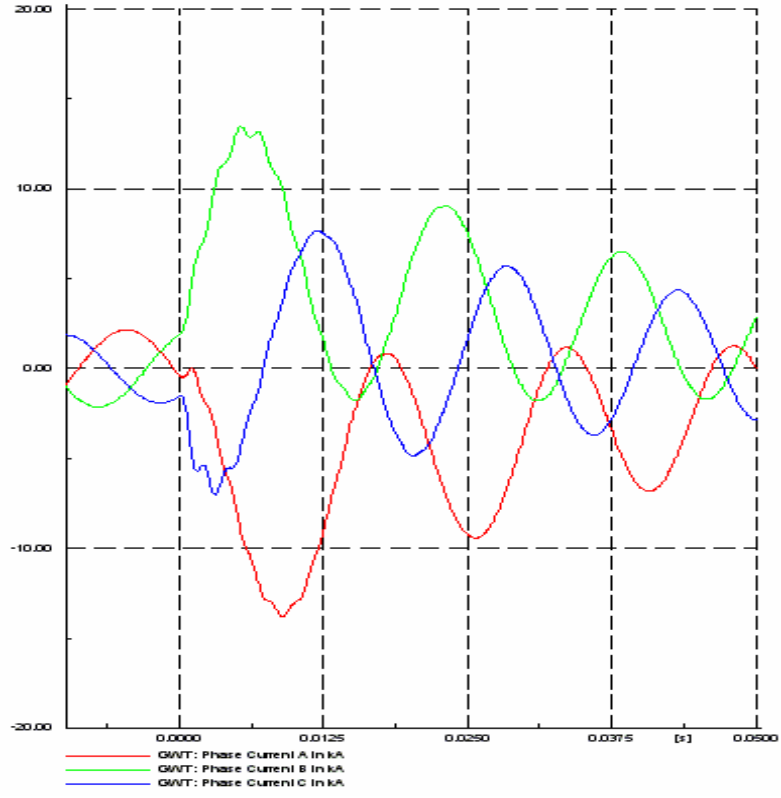
Tablo 5.2: Üç faz-toprak kısa devresi sonuçları

Düğüm	Faz	3 faz-toprak kısa devresi I _{k''} [kA]				
			671	671 ve 634	680	680 ve 634
		DÜK 0	DÜK 2 MW	DÜK 1.5+0.5 MW	DÜK 2 MW	DÜK 1.5+0.5 MW
650	A	8.61	9.71	10.01	9.65	9.96
	B	8.61	9.70	10.00	9.65	9.95
	C	8.61	9.64	9.94	9.58	9.89
632	A	4.78	6.05	6.44	5.98	6.37
	B	4.76	6.01	6.40	5.94	6.33
	C	4.56	5.79	6.18	5.71	6.10
633	A	4.09	5.02	5.40	4.97	5.36
	B	4.02	4.90	5.29	4.85	5.25
	C	3.86	4.75	5.13	4.69	5.08
634	A	14.84	16.26	19.87	16.19	19.81
	B	14.63	15.96	19.65	15.90	19.59
	C	14.09	15.60	19.25	15.53	19.18
671	A	3.30	4.75	4.95	4.67	4.87
	B	3.28	4.72	4.93	4.64	4.84
	C	3.02	4.48	4.67	4.38	4.58
675	A	3.06	4.29	4.46	4.23	4.39
	B	3.07	4.30	4.48	4.23	4.41
	C	2.82	4.08	4.24	4.23	4.16
680	A	2.84	3.87	4.01	4.30	4.45
	B	2.82	3.83	3.98	4.26	4.43
	C	2.56	3.57	3.70	4.03	4.18
Terminal(1)	A	---	20.42	21.24	18.63	19.20
	B	---	18.85	19.65	17.11	17.76
	C	---	19.20	19.97	17.43	18.05

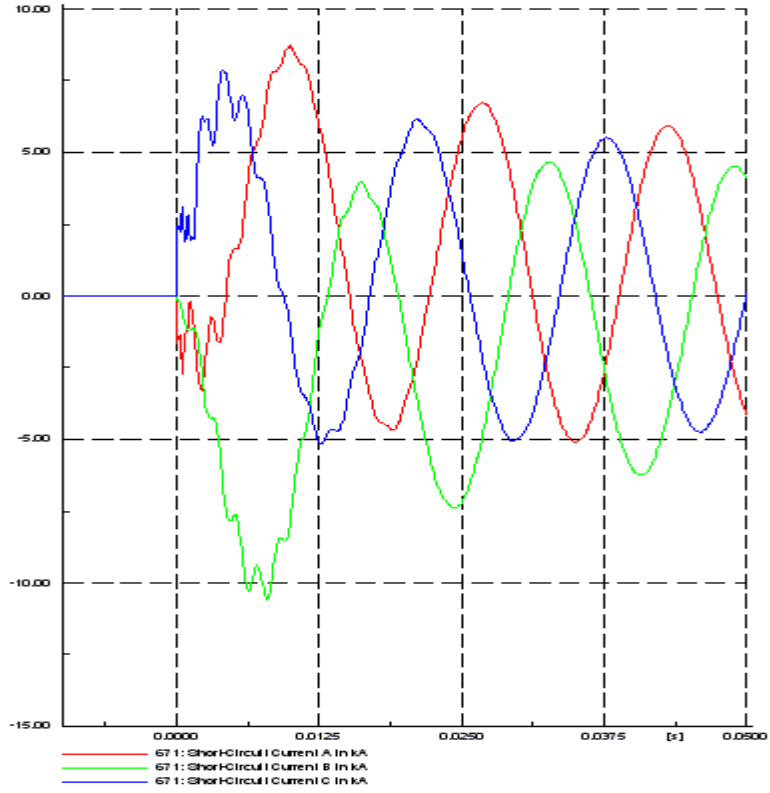
Tablo 5.3: Tek faz-toprak kısa devresi sonuçları

Düğüm	Faz	1 faz-toprak kısa devresi I_k'' [kA]				
			671	671 ve 634	680	680 ve 634
		DÜK 0	DÜK 2 MW	DÜK 1.5+0.5 MW	DÜK 2 MW	DÜK 1.5+0.5 MW
650	C	8.57	9.28	9.64	9.24	9.60
632	C	3.59	4.08	4.68	4.06	4.65
645	C	2.75	3.03	3.42	3.02	3.41
646	C	2.44	2.67	2.97	2.66	2.96
633	C	2.98	3.33	3.96	3.31	3.94
634	C	12.60	13.52	18.68	13.48	18.63
671	C	2.25	2.71	2.94	2.68	2.91
684	C	2.04	2.42	2.61	2.40	2.59
611	C	1.86	2.19	2.35	2.17	2.33
675	C	2.12	2.53	2.73	2.51	2.71
652	C	---	---	---	---	---
680	C	1.85	2.18	2.33	2.28	2.44
Terminal(1)	C	--	27.56	28.66	25.21	26.11

Şekil 5.2’de, asenkron generatörlü rüzgar türbininin cevabını görmek amacıyla gerçekleştirilen kısa devre arızasının geçici durumdaki etkileri grafik olarak verilmektedir. Üç faz-toprak kısa devresi sonucunda 671 nolu düğümdeki arıza akımı ve rüzgar türbini generatörünün (GWT) cevabına ait dalga şekilleri görülmektedir.



(a)



(b)

Şekil 5.2: Üç faz-toprak kısa devre arızası dalga şekilleri
 (a) Rüzgar türbini asenkron generatörü arıza akımı
 (b) Arızalı düğüm akımları

BÖLÜM 6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışma, gündemde yerini alan dağıtılmış üretim sistemlerini konu almıştır. Tanımı oluşturularak literatürdeki üretim kaynak teknolojileri ayrıntısı ile incelenmiştir. Dağıtılmış üretimin elektrik dağıtım sistemlerinde oluşturabileceği etkiler belirlenmiş ve bu etkiler örnek bir test sistemi üzerinde gösterilmiştir.

Tüketim merkezlerine yakın yerleştirilmiş, farklı karakteristiklere sahip üretim kaynakları dağıtılmış üretim kaynakları olarak adlandırılır. Bu kaynaklar, küçük güçlü geleneksel türbin ya da motor olabileceği gibi, yenilenebilir enerji kaynağı, mikro türbin, yakıt pili ya da depolama birimlerinden oluşur. Ada modunda ya da dağıtım sistemine senkron olarak çalışırlar. Dağıtılmış üretim kaynakları içeren elektrik dağıtım sistemleri, bu duruma göre tasarlanmamış bir sistemde beklenmeyen değişiklik ya da probleme yol açabilir. Güç akışı yönündeki değişimler, kısa devre durumunda arıza akımlarının değişimi bu etkilere örnek gösterilebilir. Bunun yanında, dağıtılmış üretim sistemleri, elektrik üretim ve tüketimini aynı bölge içinde tutması, hat kayıplarını azaltması ve sistem gerilimlerini iyileştirmesi, güç kalitesi ve güvenilirliği artırması gibi birçok yararları da beraberinde getirecektir.

Bu çalışma kapsamında, ayrıca, dengesiz üç fazlı elektrik dağıtım sisteminde dağıtılmış üretimin sürekli durum ve geçici durum etkileri, örnek bir sistem üzerinde benzetim çalışması yapılarak gösterilmiştir. Dengesiz üç fazlı elektrik dağıtım sistemi olarak birçok farklılığı içinde barındıran 13 düğümlü IEEE test fideri, dağıtılmış üretim kaynağı olarak da asenkron generatörlü rüzgar türbini ve senkron generatör seçilerek benzetim modelleri oluşturulmuştur.

Son olarak, benzetim modeli gerçekleştirilen sistemde yük akışı ve kısa devre analizleri yapılmıştır. Dağıtılmış üretim kaynağı farklı noktalara yerleştirilerek gerilim profiline olan etkileri gözlenmiştir. Kısa devre analizleri ile arıza akımlarının değişimleri incelenmiştir. Ayrıca, geçici durumda rüzgar türbinine ait asenkron

generatörün arıza akımının zamana bağlı değişimi grafiksel olarak gösterilmiştir. Modelleme ve analiz çalışması için DIgSILENT Power Factory programı kullanılmıştır.

Analiz sonuçları göstermiştir ki; dağıtılmış üretim sistemleri gerilim profiline olumlu katkılar sağlamaktadır. Aynı zamanda, dağıtılmış üretim kaynağının bağlantı noktasına göre, gerilime olan etkisinin de değiştiği görülebilmektedir. Sisteme dağıtılmış enerji kaynakları ile uygulanacak toplam gücü, bir noktadan vermek yerine, aynı gücü dağıtarak uygulamak gerilim profilindeki olumlu etkinin derecesini arttırmaktadır.

Dağıtılmış üretim kaynağı varlığının bir diğer etkisi ise arıza akımlarını arttırmasıdır. Birden fazla dağıtılmış üretim kaynağının ise arıza akımına olan etkisinin daha fazla olduğu analizler sonucu belirlenmiştir. Sistem gerilim profilinde daha etkili bir iyileşme amaçlanıyorsa, çok sayıda kullanılacak dağıtılmış üretim kaynaklarının arıza anındaki etkisi düşünülerek gerekli koruyucu önlemler alınmalıdır.

Elektrik Piyasası Serbest Tüketici Yönetmeliği'nde belirtildiği üzere 1 MW'tan fazla tüketime sahip kullanıcılar otoprodüktör lisansı alabilmektedirler. Sistemdeki kaynak sayısının artacağı düşünülerek, dağıtılmış üretim etkilerinin dikkate alınması gerektirmektedir.

Dağıtılmış üretim kaynaklarının elektrik dağıtım sistemlerine etkilerini incelemek amacıyla hazırlanan bu tez kapsamında yük akışı ve kısa devre analizleri dengesiz radyal yapıda bir sistem ele alınarak gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla seçilen 13 düğümlü IEEE test sisteminin küçük olması, sonuçların izlenmesi ve doğru olarak yorumlanması açısından önemlidir. Çalışmanın devamı niteliğinde olabilecek diğer uygulamalarda, daha büyük sistemler üzerinde farklı analizler gerçekleştirilebilir. Örneğin, çeşitli dağıtılmış üretim kaynak teknolojilerin kullanıldığı bir sistemde yük akışı ve kısa devre analizleri gerçekleştirilebileceği gibi, güç elektroniği arayüzlerine sahip kaynakların varlığında harmonik analizleri yapılabilir. Özetle, mevcut elektrik dağıtım sistemlerinin pasif yapıda olması ve dağıtılmış üretim kaynaklarının sisteme entegrasyonu, bu alanda yapılabilecek çalışmaların önünü açmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] CIGRE, “Impact of increasing contribution of dispersed generation on the power system”, *CIGRE Study Committee no 37 Final Report*, 1998.
- [2] CIRED, “Dispersed Generation”, *Preliminary Report of CIRED Working Group WG04*, 1999.
- [3] Ackermann T., Andersson G., Söder L., “Distributed generation: a definition”, *Electric Power Systems Research*, 57(3), 195-204, 2001.
- [4] El-Khattam W., Salama M. M. A., “Distributed generation technologies, definitions and benefits”, *Electric Power Systems Research*, 71(2), 119-128, 2004.
- [5] Pepermans G., Driesenb J., Haeseldonckx D., Belmans R., D’haeseleer W., “Distributed generation: definition, benefits and issues”, *Energy Policy*, 33, 787–798, 2005.
- [6] Thomson M., Infield D.G., ”Network Power Flow Analysis for a High Penetration of Distributed Generation”, *IEEE Trans on Power Systems*, 22(3), 1157–1162, 2007.
- [7] Akhmatov V., Knudsen H., “Large Penetration of Wind ana Dispersed Generation into Danish Power Grid”, *Electric Power Systems Research*, 77(4), 1228–1238, 2007.
- [8] El-Khattam W., “Investigating Distributed Generation Systems Performance Using Monte Carlo Simulation”, *IEEE Trans on Power Systems*, 21(2), 524-532, 2006.
- [9] Costa P.M., Matos M.A., “Loss Allocation in Distribution Networks With Embedded Generation”, *IEEE Trans on Power Systems*, 19(1), 384-389, 2004.
- [10] Nikkhajoei H., Iravani R., “Steady State Model and Power Flow Analysis of Electronically Coupled Distributed Resource Units”, *IEEE Trans on Power Delivery*, 22(1), 721-728, 2007.
- [11] Bhowmik A., Maitra A., Halpin S.M., Schatz J.E., “Determination of Allowable Penetration Levels of Distributed Generation Resources Based on Harmonic Limit Considerations”, *IEEE Trans on Power Delivery*, 18(2), 619-624, 2003

- [12] Prodanovic M., “Harmonic and Reactive Power Compensation as Ancillary Services in Inverter Based Distributed Generation”, *IET Generation Transmission Distribution*, 1(3), 432–438, 2007.
- [13] Jang S., Kim K-H., “An Islanding Detection Method for Distributed Generations Using Voltage Unbalance and Total Harmonic Distortion of Current”, *IEEE Trans on Power Delivery*, 19(2), 745-752, 2004.
- [14] Macken K.J., Bollen M.H.J., Belmans R.J.M., “Mitigation of Voltage Dips Through Distributed Generation Systems”, *IEEE Trans on Ind Appl*, 40(6), 1686-1693, 2004.
- [15] Oliva A.R., Balda J.C., “A PV Dispersed Generator: A Power Quality Analysis within the IEEE 519”, *IEEE Trans on Power Delivery*, 18(2), 525-530, 2003.
- [16] Chowdhury A.A., Agarwal S.K., Koval D.O., “Reliability Modeling of Distributed Generation in Conventional Distribution Systems Planning and Analysis”, *IEEE Trans on Ind Appl*, 39(5), 1493-1498, 2003.
- [17] Mao Y., Miu K.N., “Switch Placement to Improve System Reliability for Radial Distribution Systems with Distributed Generation”, *IEEE Trans on Power Systems*, 18(4), 1346-1352, 2003.
- [18] Bae I-S., Kim J-O., “Reliability Evaluation of Distributed Generation Based on Operation Mode”, *IEEE Trans on Power Systems*, 22(2), 785-790, 2007.
- [19] Bae I-S., “Optimal Operating Strategy for Distributed Generation Considering Hourly Reliability Worth”, *IEEE Trans on Power Systems*, 19(1), 287-292, 2004.
- [20] Grauers, A., “Efficiency of Three Wind Energy Generator Systems, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 11(3), 650-657, 1996
- [21] Sloopweg, J.G., De Vries, E., “Inside Wind Turbines- Fixed vs. Variable Speed”, *Renewable Energy World*, 2003
- [22] Güler, B., 2008, Jeotermal Kaynaklardan Elektrik Üretimi [online], <http://www.yerbilimleri.com/jeotermal-kaynaklardan-elektrik-uretimi/>, (Ziyaret tarihi :10 Kasım 2009)
- [23] Lasseter, B., “Microgrids (distributed power generation), *IEEE Proceedings of the Power Engineering Society Winter Meeting*, 1, 146–149, 2001
- [24] Distributed Generation in Liberalised Electricity Markets, *IEA*, Paris, 2002
- [25] Little, A. D., “Distributed Generation: System Interfaces”, 1999
- [26] Little, A. D., “Distributed Generation: System Interfaces”, 2000

[27] Geidl M., “Protection of Power Systems with Distributed Generation: State of the Art”, **Power Systems Laboratory**, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, 2005

[28] McDermott T.E., Dugan R.C., “PQ, Reliability and DG”, **IEEE Industry Applications Magazine**, 9(5), 17–23, 2003

[29] Guide for Electric Power Distribution Reliability Indices, **IEEE**

[30] Slootweg, J.G., “Wind Power Modelling and Impact on Power System Dynamics”, PhD Thesis, **Technical University of Delft**, Netherlands, 2003

EKLER

EK-A. 13 Dügümlü IEEE Test Fideri

IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY
Power System Analysis, Computing and Economics Committee



Chair

MARTIN L. BAUGHMAN
Professor Emeritus
The University of Texas at Austin
5703 Painted Valley Drive
Austin, TX 78759
Vox: 512-345-8255
Fax: 512-345-9880
baughman@mail.utexas.edu

Vice Chair

CHEN-CHING LIU
Dept. of Electrical Eng.
University of Washington
Box 352500
Seattle, WA 98195
Vox: 206-543-2198
Fax: 206-543-3842
liu@ee.washington.edu

Secretary

ROGER C. DUGAN
Sr. Consultant
Electrotek Concepts, Inc.
408 N Cedar Bluff Rd
Knoxville, TN 37923
Vox: 865-470-9222
Fax: 865-470-9223
r.dugan@ieee.org

Distribution System Analysis Subcommittee

IEEE 13 Node Test Feeder



The Institute of Electrical and Electronics

IEEE 13 Node Test Feeder

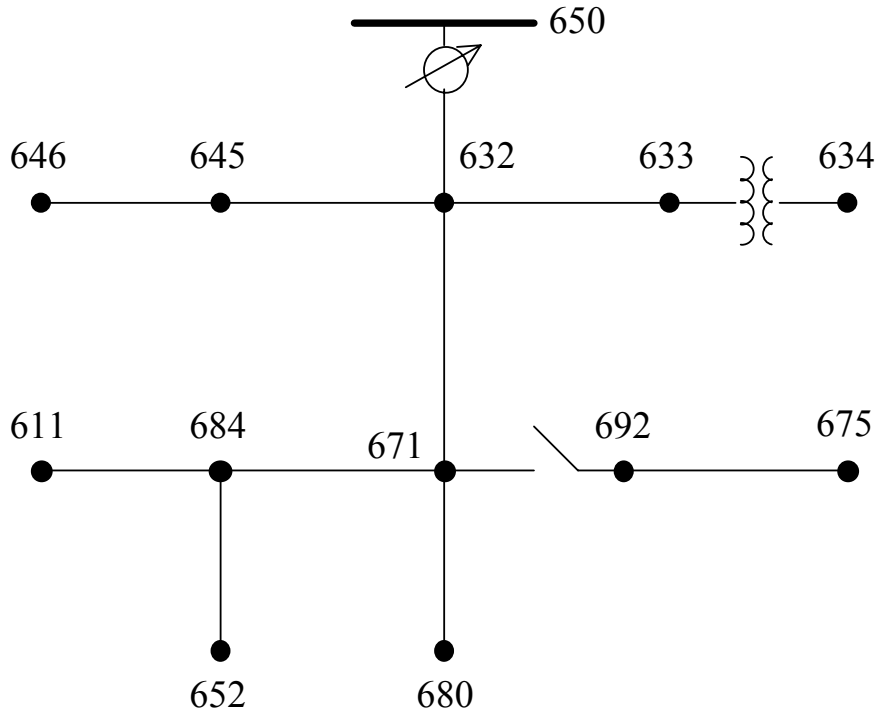


Table A1: Overhead Line Configuration Data

Config.	Phasing	Phase	Neutral	Spacing
		ACSR	ACSR	ID
601	B A C N	556,500 26/7	4/0 6/1	500
602	C A B N	4/0 6/1	4/0 6/1	500
603	C B N	1/0	1/0	505
604	A C N	1/0	1/0	505
605	C N	1/0	1/0	510

Table A2: Underground Line Configuration Data

Config.	Phasing	Cable	Neutral	Space ID
606	A B C N	250,000 AA, CN	None	515
607	A N	1/0 AA, TS	1/0 Cu	520

Tablo A3: Line Segment Data

Node A	Node B	Length(ft.)	Config.
632	645	500	603
632	633	500	602
633	634	0	XFM-1
645	646	300	603
650	632	2000	601
684	652	800	607
632	671	2000	601
671	684	300	604
671	680	1000	601
671	692	0	Switch
684	611	300	605
692	675	500	606

Tablo A4: Transformer Data

	kVA	kV-high	kV-low	R - %	X - %
Substation:	5,000	115 - D	4.16 Gr. Y	1	8
XFM -1	500	4.16 – Gr.W	0.48 – Gr.W	1.1	2

Tablo A5: Capacitor Data

Node	Ph-A	Ph-B	Ph-C
	kVAr	kVAr	kVAr
675	200	200	200
611	---	---	100
Total	200	200	300

Tablo A6: Spot Load Data

Node	Load	Ph-1	Ph-1	Ph-2	Ph-2	Ph-3	Ph-3
	Model	kW	kVAr	kW	kVAr	kW	kVAr
634	Y-PQ	160	110	120	90	120	90
645	Y-PQ	0	0	170	125	0	0
646	D-Z	0	0	230	132	0	0
652	Y-Z	128	86	0	0	0	0
671	D-PQ	385	220	385	220	385	220
675	Y-PQ	485	190	68	60	290	212
692	D-I	0	0	0	0	170	151
611	Y-I	0	0	0	0	170	80
	TOTAL	1158	606	973	627	1135	753

Tablo A7: Distributed Load Data

Node A	Node B	Load	Ph-1	Ph-1	Ph-2	Ph-2	Ph-3	Ph-3
		Model	kW	kVAr	kW	kVAr	kW	kVAr
632	671	Y-PQ	17	10	66	38	117	68

Ek-B. Yeraltı Kablolarının Empedans Hesabı

Series Impedance of Underground Lines

Figure B1 shows the general configuration of three underground cables (concentric neutral or tape shielded) with an additional neutral conductor. The modified Carson's equations can be applied to underground cables in much the same manner as for overhead lines. The circuit of Figure B1 will result in a 7x7 primitive impedance matrix. For underground circuits that do not have the additional neutral conductor, the primitive impedance matrix will be 6x 6.

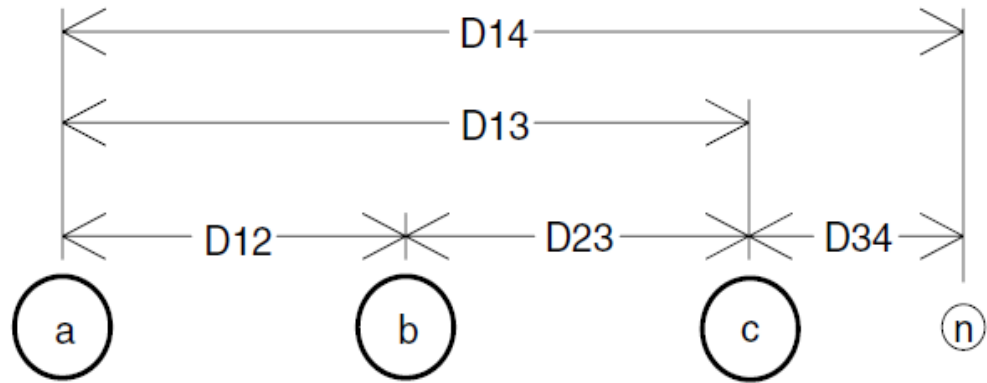


FIGURE B1: Three-phase underground with additional neutral.

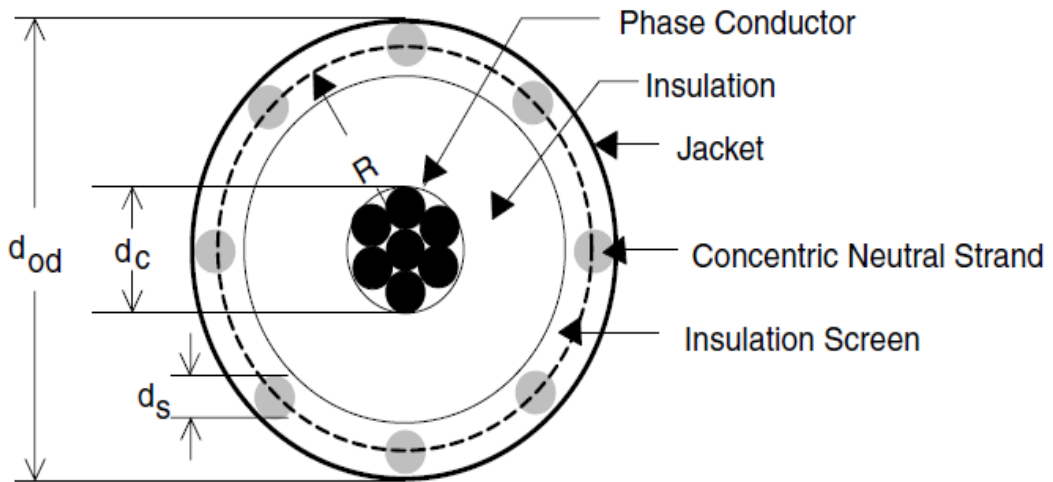


FIGURE B2: Concentric neutral cable.

Two popular types of underground cables are the concentric neutral cable and the tape-shielded cable. To apply the modified Carson's equations, the resistance and GMR of the phase conductor and the equivalent neutral must be known.

Concentric Neutral Cable

Figure B2 shows a simple detail of a concentric neutral cable. The cable consists of a central phase conductor covered by a thin layer of nonmetallic semiconducting screen, to which is bonded the insulating material. The insulation is then covered by a semiconducting insulation screen. The solid strands of concentric neutral are spiraled around the semiconducting screen with a uniform spacing between strands. Some cables will also have an insulating jacket encircling the neutral strands.

dc = phase conductor diameter (inches)

dod = nominal diameter over the concentric neutrals of the cable (inches)

ds = diameter of a concentric neutral strand (inches)

GMR_c = geometric mean radius of the phase conductor (ft.)

GMR_s = geometric mean radius of a neutral strand (ft.)

rc = resistance of the phase conductor (Ω /mile)

rs = resistance of a solid neutral strand (Ω /mile)

k = number of concentric neutral strands

The geometric mean radius of the phase conductor and a neutral strand are obtained from a standard table of conductor data. The equivalent geometric mean radius of the concentric neutral is computed using the equation for the geometric mean radius of bundled conductors used in high voltage transmission lines.

$$GMR_{cn} = \sqrt[k]{GMR_s k R^{k-1}} \text{ ft} \quad (1)$$

R = radius of a circle passing through the center of the concentric neutral strands

$$R = \frac{d_{od} - d_s}{24} \text{ ft} \quad (2)$$

The equivalent resistance of the concentric neutral is

$$r_{cn} = \frac{r_s}{k} \quad \Omega / \text{mile} \quad (3)$$

The various spacings between a concentric neutral and the phase conductors and other concentric neutrals are as follows:

Concentric neutral to its own phase conductor

$$D_{ij} = R \text{ (Equation 2 above)}$$

Concentric neutral to an adjacent concentric neutral

$$D_{ij} = \text{center-to-center distance of the phase conductors}$$

Concentric neutral to an adjacent phase conductor

Figure B3 shows the relationship between the distance between centers of concentric neutral cables and the radius of a circle passing through the centers of the neutral strands. The geometric mean distance between a concentric neutral and an adjacent phase conductor is given by:

$$D_{ij} = \sqrt[k]{D_{nm}^k k - R^k} \quad \text{ft} \quad (4)$$

where D_{nm} = center-to-center distance between phase conductors. For cables buried in a trench the distance between cables will be much greater than the radius R , and therefore it may be assumed that D_{ij} in Equation 4 is equal to D_{nm} . For cables in conduit that assumption is not valid. In applying the modified Carson's equations, the numbering of conductors and neutrals is important.

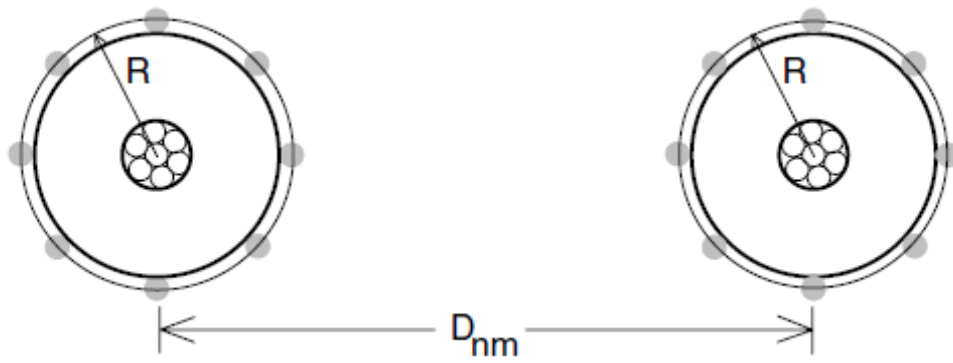


FIGURE B3: Distances between concentric neutral cables

For example, a three-phase underground circuit with an additional neutral conductor must be numbered as:

- 1 = phase conductor #1
- 2 = phase conductor #2
- 3 = phase conductor #3
- 4 = neutral of conductor #1
- 5 = neutral of conductor #2
- 6 = neutral of conductor #3
- 7 = additional neutral conductor (if present)

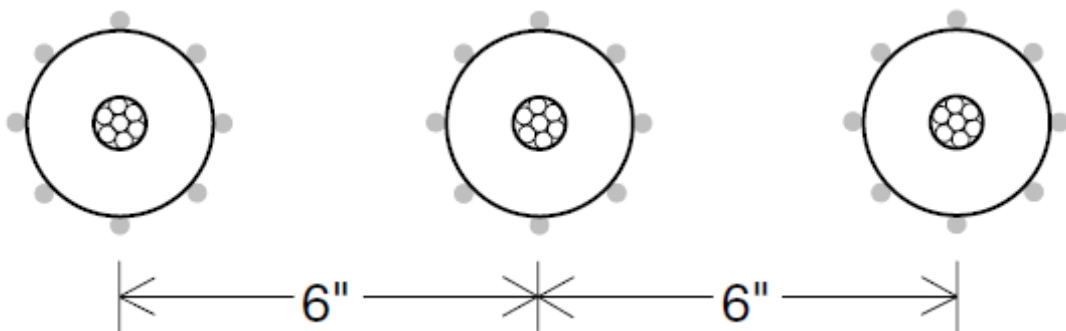


FIGURE B4: Three-phase concentric neutral cable spacing.

Example 4.2

Three concentric neutral cables are buried in a trench with spacings as shown in Figure B4. The cables are 15 kV, 250,000 CM stranded all-aluminum with 13 strands of #14 annealed, coated copper wires (1/3 neutral). The outside diameter of the cable over the neutral strands is 1.29 inches. Determine the phase impedance matrix and the sequence impedance matrix.

SOLUTION

The data for the phase conductor and neutral strands from a conductor data table are;
250,000 AA phase conductor:

$$\text{GMR} = 0.0171 \text{ ft.}$$

$$\text{Diameter} = 0.567 \text{ inches}$$

$$\text{Resistance} = 0.4100 \text{ } \Omega/\text{mile}$$

#14 copper neutral strands:

$$\text{GMR}_s = 0.00208 \text{ ft.}$$

$$\text{Resistance} = 14.8722 \text{ } \Omega/\text{mile}$$

$$\text{Diameter } (d_s) = 0.0641 \text{ inches}$$

The radius of the circle passing through the center of the strands (Equation 2) is

$$R = \frac{d_{od} - d_s}{24} = 0.0511 \text{ ft}$$

The equivalent GMR of the concentric neutral is computed by:

$$\text{GMR}_{cn} = \sqrt[k]{\text{GMR}_s k R^{k-1}} = \sqrt[13]{0.00208 \cdot 13 \cdot 0.0511^{13-1}} = 0.0486 \text{ ft}$$

The equivalent resistance of the concentric neutral is

$$r_{cn} = \frac{r_s}{k} = \frac{14.8722}{13} = 1.1438 \text{ } \Omega/\text{mile}$$

The phase conductors are numbered 1, 2, and 3. The concentric neutrals are numbered 4, 5, and 6. The conductor-to-conductor and concentric neutral to concentric neutral spacings are;

$$\begin{aligned} D_{12} &= D_{21} = D_{45} = D_{54} = 0.5 \text{ ft} \\ D_{23} &= D_{32} = D_{56} = D_{65} = 0.5 \text{ ft} \\ D_{31} &= D_{13} = D_{64} = D_{46} = 1.0 \text{ ft} \end{aligned}$$

The spacings between conductors and their concentric neutrals are

$$D_{14} = D_{25} = D_{36} = R = 0.0511 \text{ ft}$$

Since the radius R is much smaller than the spacings between cables, the distances between concentric neutrals and adjacent phase conductors are just the center-to-center distances between conductors:

$$\begin{aligned} D_{15} &= D_{51} = 0.5 \\ D_{26} &= D_{62} = 0.5 \text{ ft} \\ D_{61} &= D_{16} = 1.0 \end{aligned}$$

The self impedance for the cable in position 1 is

$$\begin{aligned} \hat{Z}_{11} &= 0.0953 + 0.41 + j0.12134 \cdot \left(\ln \frac{1}{0.0171} + 7.93402 \right) \\ &= 0.5053 + j1.4564 \Omega / \text{mile} \end{aligned}$$

The self impedance for the concentric neutral for Cable #1 is

$$\begin{aligned} \hat{Z}_{44} &= 0.0953 + 1.144 + j0.12134 \cdot \left(\ln \frac{1}{0.0486} + 7.93402 \right) \\ &= 1.2393 + j1.3296 \Omega / \text{mile} \end{aligned}$$

The mutual impedance between Cable #1 and Cable #2 is

$$\hat{Z}_{12} = 0.0953 + j0.12134 \cdot \left(\ln \frac{1}{0.5} + 7.93402 \right) = 0.0953 + j1.0468 \quad \Omega / \text{mile}$$

The mutual impedance between Cable #1 and its concentric neutral is

$$\hat{Z}_{14} = 0.0953 + j0.12134 \cdot \left(\ln \frac{1}{0.0511} + 7.93402 \right) = 0.0953 + j1.3236 \quad \Omega / \text{mile}$$

The mutual impedance between the concentric neutral of Cable #1 and the concentric neutral of Cable #2 is

$$\hat{Z}_{45} = 0.0953 + j0.12134 \cdot \left(\ln \frac{1}{0.5} + 7.93402 \right) = 0.0953 + j1.0468 \quad \Omega / \text{mile}$$

Continuing the application of the modified Carson's equations results in a 6×6 primitive impedance matrix. This matrix in partitioned form is

$$\begin{bmatrix} \hat{Z}_{ij} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} .5053 + j1.4564 & .0953 + j1.0468 & .0953 + j.9627 \\ .0953 + j1.0468 & .5053 + j1.4564 & .0953 + j1.0468 \\ .0953 + j.9627 & .0953 + j1.0468 & .5053 + j1.4564 \end{bmatrix} \quad \Omega / \text{mile}$$

$$\begin{bmatrix} \hat{Z}_{in} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} .953 + j1.3236 & .0953 + j1.0468 & .0953 + j.9627 \\ .0953 + j1.0468 & .953 + j1.3236 & .0953 + j1.0468 \\ .0953 + j.9627 & .0953 + j1.0468 & .953 + j1.3236 \end{bmatrix} \quad \Omega / \text{mile}$$

$$\begin{bmatrix} \hat{Z}_{nj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{Z}_{in} \end{bmatrix}^T$$

$$\begin{bmatrix} \hat{Z}_{mn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.2391 + j1.3296 & .0953 + j1.0468 & .0953 + j.9627 \\ .0953 + j1.0468 & 1.2391 + j1.3296 & .0953 + j1.0468 \\ .0953 + j.9627 & .0953 + j1.0468 & 1.2391 + j1.3296 \end{bmatrix} \quad \Omega / \text{mile}$$

Using the Kron reduction results in the phase impedance matrix:

$$\begin{aligned} \left[\mathbf{Z}_{abc} \right] &= \left[\hat{\mathbf{Z}}_{ij} \right] - \left[\hat{\mathbf{Z}}_{in} \right] \cdot \left[\hat{\mathbf{Z}}_{nn} \right]^{-1} \cdot \left[\hat{\mathbf{Z}}_{nj} \right] \\ \left[\mathbf{Z}_{abc} \right] &= \begin{bmatrix} 0.7981 + j0.4463 & 0.3191 + j0.0328 & 0.2849 - j0.0143 \\ 0.3191 + j0.0328 & 0.7981 + j0.4041 & 0.3191 + j0.0328 \\ 0.2849 - j0.0143 & 0.3191 + j0.0328 & 0.7981 + j0.4463 \end{bmatrix} \Omega / \text{mile} \end{aligned}$$

The sequence impedance matrix for the concentric neutral three-phase line is:

$$\begin{aligned} \left[\mathbf{Z}_{012} \right] &= \left[\mathbf{A}_s \right]^{-1} \cdot \left[\mathbf{Z}_{abc} \right] \cdot \left[\mathbf{A}_s \right] \\ \left[\mathbf{Z}_{012} \right] &= \begin{bmatrix} 1.4105 + j0.4665 & -0.0028 - j0.0081 & -0.0056 - j0.0065 \\ -0.0056 - j0.0065 & 0.4874 + j0.4151 & -0.0264 + j0.0451 \\ -0.0028 - j0.0081 & 0.0523 + j0.0003 & 0.4874 + j0.4151 \end{bmatrix} \Omega / \text{mile} \end{aligned}$$

ÖZGEÇMİŞ

1982 yılında Kocaeli’de doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Kocaeli’de tamamladı. 2000 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü’nden 2004 yılında Elektrik Mühendisi olarak mezun oldu. 2009 yılından beri Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü’nde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.