

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**GÜÇ KALİTESİ İNDİSLERİ İLE DAĞITILMIŞ ÜRETİM
SİSTEMLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ**

BAŞAK EKİNCİ

KOCAELİ 2021

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GÜÇ KALİTESİ İNDİSLERİ İLE DAĞITILMIŞ ÜRETİM
SİSTEMLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

BAŞAK EKİNCİ

Prof.Dr. Ayşen BASA ARSOY

Danışman, Kocaeli Üniversitesi

.....

Doç.Dr. Nuran YÖRÜKEREN

Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi

.....

Dr.Öğr. Üyesi İbrahim Gürsu TEKDEMİR

Jüri Üyesi, Bursa Teknik Üniversitesi

.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 25.01.2021

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması, güç kalitesi indisleri aracılığıyla dağıtılmış üretimin varlığının güç kalitesini üzerindeki etkisini tespit etmek amacıyla gerçekleştirilmiştir.

Yüksek lisans eğitimim süresince benden desteğini esirgemeyen, tezimin her aşamasında bilgi ve tecrübesini benimle paylaşarak çalışmalarına katkıda bulunan ve yoğun akademik çalışma hayatında değerli zamanından bana ayıran saygıdeğer hocam, tez danışmanım Prof. Dr. Ayşen BASA ARSOY'a tüm içtenliğimle teşekkür ederim.

Akademik çalışmalarım sırasında, bana desteğini esirgemeyen değerli meslektaşım Vural Aydoğan'a,

Maddi ve manevi desteklerini tüm hayatı boyunca benden esirgemeyen başta merhum babam Murat EKİNCİ olmak üzere, annem Nergiz EKİNCİ'ye ve ablam Ekin EKİNCİ'ye teşekkürü bir borç bilirim.

Ocak – 2021

Başak EKİNCİ

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iii
TABLolar DİZİNİ	v
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ÖZET.....	viii
ABSTRACT.....	ix
GİRİŞ	1
1. GÜÇ KALİTESİ İNDİSLERİ	7
1.1. Güç Kalitesi	7
1.2. Geleneksel Güç Kalitesi İndisleri	9
1.2.1. Gerilim düşmesi ve yükselmesi	18
1.2.2. Gerilim dengesizliği	18
1.2.3. Harmonikler	19
1.2.3.1. Toplam talep distorsiyonu (TTD)	20
1.2.3.2. Telefon etkileşim faktörü (TEF)	21
2. DAĞITILMIŞ ÜRETİM	22
2.1. Dağıtılmış Üretim Teknolojileri	23
2.1.1. Mikro türbinler	25
2.1.2. Yakıt pilleri	26
2.1.3. Yenilenebilir enerji kaynakları.....	26
2.2. Dağıtılmış Üretimin Güç Kalitesine Etkisi	27
2.2.1. Güç kalitesi değişim indisleri.....	28
2.2.1.1. Tekil değişim indisleri	29
2.2.1.1.1. Harmonikler	29
2.2.1.1.2. Gerilim düşmesi	29
2.2.1.2. Sistem indisleri ve sistem değişim indisleri	30
3. BENZETİM ÇALIŞMASI	32
3.1. Test Düzenegi	32
3.1.1. Baralar	32
3.1.2. Trafolar.....	34
3.1.3. Hatlar.....	34
3.1.4. Dağıtılmış üretim kaynakları.....	38
3.2. Analizi Yapılan Durumlar.....	38
3.3. Benzetim Sonuçları.....	39
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	56
KAYNAKLAR	58
EKLER.....	63
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER	84
ÖZGEÇMİŞ	85

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	Dağıtılmış üretim teknolojileri	25
Şekil 3.1.	Rabak fiderine ait tek hat şeması.....	33
Şekil 3.2.	En yakın bara (B2) için senkron generatörün bağlı olduğu durumda THD değişim indisleri.....	42
Şekil 3.3.	En yakın bara (B2) için rüzgar çiftliğinin bağlı olduğu durumda THD değişim indisleri.....	42
Şekil 3.4.	En uzak bara (B4.2.2.2) için senkron generatörün bağlı olduğu durumda THD değişim indisleri.....	43
Şekil 3.5.	En uzak bara (B4.2.2.2) için rüzgar çiftliğinin bağlı olduğu durumda THD değişim indisleri.....	43
Şekil 3.6.	En yakın bara (B2) için senkron generatörün bağlı olduğu durumda gerilim değişim indisleri	45
Şekil 3.7.	En yakın bara (B2) için rüzgar çiftliğinin bağlı olduğu durumda gerilim değişim indisleri.....	45
Şekil 3.8.	En uzak bara (B4.2.2.2) için senkron generatörün bağlı olduğu durumda gerilim değişim indisleri	46
Şekil 3.9.	En uzak bara (B4.2.2.2) için rüzgar çiftliğinin bağlı olduğu durumda gerilim değişim indisleri	46
Şekil 3.10.	B1.2 isimli barada harmonikli yük tanımlı olduğu durumda en yakın ve en uzak baralara ayrı ayrı 3 adet DÜK bağlı iken THD değişim indisleri	48
Şekil 3.11.	Tüm yüklerin harmonikli olduğu durum ile B1.2 isimli barada harmonikli yükün var olması durumunda THD değişim indislerinin kıyaslanması.....	49
Şekil 3.12.	B4 barasında senkron generatör ve rüzgar çiftliğinin bağlı olduğu durumlar için THD değişim indislerinin kıyaslanması	50
Şekil 3.13.	B4 barasında senkron generatör ve rüzgar çiftliğinin bağlı olduğu durumlar için gerilim düşme değişim indislerinin kıyaslanması	51
Şekil 3.14.	Tüm sistemde farklı harmonik değerlerindeki yüklerin var olduğu durum için THD değişim indislerinin senkron generatör ve rüzgar çiftliği açısından kıyaslanması	53
Şekil 3.15.	B4.2.2.2.1.1 ve B4.2.2.2.2.1 baralarında farklı harmonik değerlerindeki yüklerin tanımlı olduğu durum için B4.2.2.2 barasına senkron generatör ve rüzgar çiftliğinin bağlı olması halinde THD değişim indislerinin kıyaslanması	54
Şekil 3.16.	İyileşmenin en yüksek olduğu baralar.....	55
Şekil A.1.	Proje isimlendirme penceresi	65
Şekil A.2.	Şebekenin adlandırılması ve şebeke frekansının belirlenmesi penceresi.....	66
Şekil A.3.	Kütüphane oluşturma penceresi	67
Şekil A.4.	Alt kütüphane oluşturma penceresi 1. adım	67
Şekil A.5.	Alt kütüphane oluşturma penceresi 2. adım	68

Şekil A.6. Oluşturulan alt kütüphaneyi gösteren pencere	68
Şekil A.7. Type Creation penceresi.....	69
Şekil A.8. 2-Winding Transformer Type penceresi	69
Şekil A.9. Eklenen elemanın kütüphanedeki görüntüsü.....	70
Şekil A.10. Örnek sistem.....	71
Şekil A.11. Çizim araç çubuğunda yer alan bara sembolleri	71
Şekil A.12. Baraların sisteme yerleştirilmiş hali.....	71
Şekil A.13. Veri girme penceresi	72
Şekil A.14. Extra Grid penceresi.....	72
Şekil A.15. 2-Winding Transformer penceresi	73
Şekil A.16. 2-Winding Transformer özelliklerinin belirlendiği pencere	73
Şekil A.17. Line penceresi	74
Şekil A.18. Tower Type penceresi	75
Şekil A.19. Conductor Type penceresi.....	75
Şekil A.20. İletkene ait verilerin girildiği pencere	76
Şekil A.21. Swallow iletkenine ait verilerin girildiği pencere	76
Şekil A.22. Swallow iletkeninin hatta konumlandırılması.....	77
Şekil A.23. General Load penceresi	77
Şekil A.24. Load Flow sekmesi penceresi	78
Şekil A.25. Contoller ekleme penceresi	78
Şekil A.26. Senkron generatöre ait Basic Data bilgisinin girilmesi.....	79
Şekil A.27. Senkron generatöre ait Load Flow bilgisinin girilmesi.....	79
Şekil A.28. Rüzgar çiftliğine ait Basic Data bilgisinin girilmesi	80
Şekil A.29. Rüzgar çiftliğine ait Load Flow bilgisinin girilmesi	80
Şekil A.30. Harmonik kaynağına ait bilgilerin girilmesi	81
Şekil A.31. Harmonik kaynağını sistem elemanına dahil etme	81
Şekil A.32. Harmonik analizi gerçekleştirme	82
Şekil A.33. THD değerlerinin okunduğu pencere.....	82

TABLULAR DİZİNİ

Tablo 1.1.	IEEE 1159–2019 standartına göre güç kalitesi bozulmalarının sınıflandırılması.....	8
Tablo 1.2.	Güç kalitesi problemlerinin detaylı incelenmesi.....	10
Tablo 1.3.	IEEE tarafından belirlenen harmonik bozulmalara ilişkin sınır değerler.....	19
Tablo 3.1.	Baralara ait özet veriler	32
Tablo 3.2.	Yüklere ait harmonik bilgileri	34
Tablo 3.3.	Dönüştürme oranı 34,5/0,4 kV olan transformatörlere ait özet veriler	34
Tablo 3.4.	Hat verileri.....	35
Tablo 3.5.	Yüklere ait yeni harmonik değerleri.....	39
Tablo 3.6.	Baralara ait % THD değerleri.....	40
Tablo 3.7.	Gerilim değerlerini içeren güç akışı analizleri sonuçları	40
Tablo 3.8.	En yakın bara için kısa devre analizi sonuçları	41
Tablo 3.9.	En uzak bara için kısa devre analizi sonuçları	41
Tablo 3.10.	En yakın bara (B2) için THD değişim indislerinin ortalama değerlerinin senkron generatörler ve rüzgar çiftlikleri üzerinden karşılaştırılması	44
Tablo 3.11.	En uzak bara (B4.2.2.2) için THD değişim indislerinin ortalama değerlerinin senkron generatörler ve rüzgar çiftlikleri üzerinden karşılaştırılması	44
Tablo 3.12.	En yakın bara (B2) için THD sistem indisleri değerleri.....	44
Tablo 3.13.	En uzak bara (B4.2.2.2) için THD sistem indisleri değerleri.....	44
Tablo 3.14.	En yakın bara (B2) için gerilim değişim indislerinin ortalama değerlerinin senkron generatörler ve rüzgar çiftlikleri üzerinden karşılaştırılması	46
Tablo 3.15.	En uzak bara (B4.2.2.2) için gerilim değişim indislerinin ortalama değerlerinin senkron generatörler ve rüzgar çiftlikleri üzerinden karşılaştırılması.....	47

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

HD_I	: Akıma ait tekil harmonik distorsiyonu
HD_V	: Gerilime ait tekil harmonik distorsiyonu
I_1	: Temel akım bileşeni
I_{ef}	: Akımın efektif değeri
I_L	: Güç sisteminin besleme noktasından bir yük tarafından çekilen temel frekansa sahip maksimum akım değeri
I_n	: n. mertebeden harmonikli akım
$i(t)$: Akımın ani değeri
$i_n(t)$: Harmonikli akıma ait ani değer
K_d	: Gerilim dengesizlik faktörü
M	: Yük barası sayısı
n	: Harmonik mertebesi
P	: Aktif güç
PQI	: Güç kalitesi indisi
δ_n	: Akım faz farkı açısı
$STHD$: Sistem toplam harmonik distorsiyonu
$STHD_D$: Sistem toplam harmonik distorsiyonu değişim indisi
$STHD_E$: Dağıtılmış üretim birimi sisteme entegre edilmeden önceki sistem toplam harmonik distorsiyonu indisi
$STHD_Y$: Dağıtılmış üretim birimi sisteme entegre edildikten sonraki sistem toplam harmonik distorsiyonu indisi
$SVDA$: Sistem gerilim düşme indisi
θ_n	: Gerilim faz farkı açısı
t	: Süre
TEF_I	: Akım için telefon etkileşim faktörü
TEF_V	: Gerilim için telefon etkileşim faktörü
THD_{Dj}	: j. baradaki toplam harmonik distorsiyonu değişim indisi
THD_{Ej}	: Dağıtılmış üretim birimi sisteme entegre edilmeden önceki j. baradaki toplam harmonik distorsiyonu
THD_I	: Akıma ait toplam harmonik distorsiyonu
THD_V	: Gerilime ait toplam harmonik distorsiyonu
THD_{Yj}	: Sisteme yeni entegre edilen dağıtılmış üretim biriminden sonra j. baradaki toplam harmonik distorsiyonu
TTD	: Toplam talep distorsiyonu
V	: Nominal gerilim
V_1	: Temel gerilim bileşeni
V_{-1}	: Negatif alternans gerilim bileşeni
V_{+1}	: Pozitif alternans gerilim bileşeni
V_{ef}	: Gerilimin efektif değeri
V_n	: n. mertebeden harmonikli gerilim
$V_n(t)$: Harmonikli gerilime ait ani değer
$V(t)$: Gerilimin ani değeri
VDA_k	: k. baraya ait gerilim düşme indisi

VDA_{Dj}	:	j. baradaki gerilim düşme değişim indisi
VDA_{Ej}	:	Yeni bir dağıtılmış üretim biriminin sisteme entegrasyonundan önce j. baradaki gerilim düşme indisi değeri
VDA_{Yj}	:	Yeni bir dağıtılmış üretim biriminin sisteme entegrasyonundan sonraki j. baradaki gerilim düşme indisi değeri
w_1	:	Açısal hız
w_k	:	k. baranın ağırlık faktörü
w_n	:	n. mertebeden harmoniğe bağlı bir katsayı
X_E	:	Dağıtılmış üretim kurulmadan önce tekil ya da global X indisi
X_Y	:	Dağıtılmış üretim kurulduktan sonra tekil ya da global X indisi
X_D	:	Güç kalitesi değişim indisi

Kısaltmalar

AC	:	Alternatif Akım
DC	:	Doğru Akım
IEEE	:	Institute of Electrical and Electronics Engineer
RMS	:	Etkin değer
THD	:	Toplam Harmonik Distorsiyonu

GÜÇ KALİTESİ İNDİSLERİ İLE DAĞITILMIŞ ÜRETİM SİSTEMLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

ÖZET

Güç sistemlerinin etkin ve verimli bir şekilde kullanılması dağıtılan gücün kaliteli olması ile ilişkilidir. Şebeke üzerinde tam kontrolün sağlanabilmesi için güç kalitesi izlenmeli ve üzerine çeşitli analizler yapılmalıdır.

Dağıtım sistemlerindeki tüketici sayısı göz önüne alındığında güç kalitesi konusunun ne kadar önemli olduğu anlaşılmaktadır. Dağıtılmış üretim kaynaklarının (DÜK) güç kalitesi üzerinde olumlu ve olumsuz etkileri mevcuttur. DÜK'lerin güç sistemlerindeki varlığının gün geçtikçe artması bunların şebeke üzerindeki etkilerinin incelenmesini gerektirmektedir. Bu tez DÜK'lerin varlığının güç kalitesi, üzerindeki etkilerini indisler vasıtasıyla incelemek üzere hazırlanmıştır.

Tez çalışmasında dağıtılmış üretimin sisteme entegrasyonunun öncesi ve sonrasındaki güç kalitesi konusundaki cevaplar gerilim düşme indisi ve toplam harmonik distorsiyonu indisi vasıtasıyla değerlendirilmiştir. Bu amaçla güç kalitesi, problemlerinden olan toplam harmonik distorsiyonu (THD) ve gerilim düşmesi için gerçek bir test sistemi üzerinden farklı harmonik seviyelerinde çeşitli benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir ve güç kalitesi değişim indisleri hesaplanmıştır. Yapılan benzetim çalışmaları sonucunda dikkate alınan indislerin DÜK'lerin varlığında bir dağıtım şebekesinin güç kalitesi davranışını analiz etmek için önemli bir araç olduğu ve DÜK'ün artan gücü ve şebekeden uzaklaşması ile birlikte harmonik ve gerilim profilinde iyileşmeler olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Dağıtılmış Üretim, Gerilim Düşmesi, Güç Kalitesi, Güç Kalitesi İndisleri, Toplam Harmonik Distorsiyonu.

EVALUATION OF DISTRIBUTED GENERATION SYSTEMS WITH POWER QUALITY INDICES

ABSTRACT

Efficient and effective use of power systems is associated with the quality of the distributed power. To provide full control over the grid, power quality should be monitored and various analyzes should be made on it.

Considering the number of consumers in distribution systems, it is understood how important the power quality issue is. Distributed generation sources (DGS) have positive and negative effects on power quality. Increasing presence of DGSs in power systems requires examination of their effects on the grid. This thesis has been prepared to examine the effects of DGSs on power quality through indices.

In this thesis, the answers about the power quality before and after the integration of distributed generation into the system are evaluated by means of the voltage dip index and total harmonic distortion index. For this purpose, various simulation studies at different harmonic levels have been carried out on a real test system for total harmonic distortion (THD) and voltage dip, which are among the power quality problems, and power quality variation indices have been calculated. As a result of the simulation studies, it has been observed that the indices considered are an important tool to analyze the power quality behavior of a distribution network in the presence of DGSs, and there are improvements in the harmonic and voltage profile with the increasing power and moving away of the DGS from the network.

Keywords: Distributed Generation, Voltage Dip, Power Quality, Power Quality Indices, Total Harmonic Distortion.

GİRİŞ

Gelişen teknoloji ile birlikte sanayi sektörü her geçen gün tüm dünyada ilerleme göstermektedir. Bunun bir sonucu olarak da güç tüketimi sürekli bir şekilde artmaya devam etmektedir. Artan güç tüketimi ile birlikte güç kalitesi kavramı ortaya çıkmış ve oldukça önemli bir hale gelmiştir. Güç kalitesinin önemli hale gelmesinde: (I) Şebekede var olan yüklerin çoğunun mikroişlemci tabanlı güç elektroniği elemanları ile donatılması ve bu elemanların güç kalitesi problemlerine karşı yüksek düzeyde hassasiyet göstermesi, (II) Tüm paydaşların konu ile ilgili bilinçli hale gelmesi, (III) Meydana gelecek bir bozulmanın hem ekonomik hem de güvenlik açısından stratejik öneme sahip olması etkili olmuştur.

Günümüzde geleneksel üretim kaynaklarının yerini yenilenebilir kaynaklar almasıyla dağıtılmış üretim güç sistemlerine dahil edilmiştir. Geleneksel kaynaklarda irdelediğimiz gibi güç sistemlerinde geniş bir yer tutan dağıtılmış üretim sistemlerinin varlığında da güç kalitesi konusunun irdelenmesi kaçınılmaz olmuştur. Bu konu üzerine yapılmış çok sayıda çalışma literatürde mevcuttur (Borges ve Falcao, 2003; Martinez ve Martin-Arnedo, 2009; Moreno-Munoz ve diğ., 2010; Zeng ve diğ., 2015; Kaddah ve diğ., 2015; Ogunjuyigbe ve diğ. 2016; Silva ve diğ., 2016; Bajaj ve Singh, 2019; Razavi ve diğ., 2019; Bawa ve diğ., 2019; Mahela ve diğ., 2020; Jasinski ve diğ., 2020).

Borges ve Falcao (2003) dağıtılmış üretim birimlerinin, dağıtım şebekelerindeki kayıplar, güvenilirlik ve gerilim profili üzerindeki etkisini değerlendirmişlerdir. Martinez ve Martin-Arnedo (2009) ise yaptıkları çalışmada hem dağıtılmış üretimin koruma uygulamaları üzerindeki etkilerini hem de küçük dağıtılmış üretim birimlerinin gerilim düşmeleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Her iki çalışmanın sonucunda dağıtılmış üretim birimlerinin yeri, tipi ve boyutunun; arıza akım seviyelerini, rölelerin koruma koordinasyonunu, kararlılığını ve güç kalitesini etkileyebilecek üç ana faktör olarak tespit edilmiştir.

Moreno-Munoz ve diğ. (2010) dağıtılmış üretim birimi olarak kombine ısı güç santralının var olduğu bir endüstriyel tesiste güç kalitesi problemlerinden olan gerilim düşüşü ve anlık kesintileri değerlendirmişlerdir. Dağıtılmış üretimin varlığının güvenilirlik açısından olumlu sonuçlar verdiği görülmüştür.

Zeng ve diğ. (2015) alçak gerilim şebekelerinde güç kalitesinin artırılması amacıyla çalışmalarında çok fonksiyonlu dağıtılmış bir üretim birimi ve kontrol stratejisi önermişlerdir.

Kaddah ve diğ. (2015) yaptıkları çalışma ile dağıtılmış üretimin dağıtım sistemleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir ve bir dağıtım sisteminde sistem performansını düşürmeden benimsenebilecek maksimum dağıtılmış üretim penetrasyonunu belirlemişlerdir.

Ogunjuyigbe ve diğ. (2016) dağıtılmış üretimin farklı penetrasyon seviyeleri için gerilim profili üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Farklı senaryolar ile elde edilen gerilim profilleri karşılaştırılmış ve sonuç olarak dağıtılmış üretim birimlerinin gerilim profili üzerindeki etkisinin dağıtılmış üretim teknolojisine, penetrasyon seviyesine ve dağıtılmış üretim biriminin şebekeye bağlı olduğu konuma göre değiştiği gözlemlenmiştir.

Silva ve diğ. (2016) fotovoltaik dağıtılmış üretim biriminin var olduğu bir dağıtım şebekesi için söz konusu dağıtım şebekesinde uzun süreli gerilim değişimi ve gerilim dengesizliği gibi güç kalitesi problemlerini ifade eden güç kalitesi indislerini analiz etmişlerdir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda görülmüştür ki dağıtılmış üretim ünitesinin dağıtım şebekesine entegre edilmesiyle birlikte gerilim dengesizlik indisinde büyük değişiklikler yaşanmıştır. Ayrıca fotovoltaik dağıtılmış üretim biriminin güç kalitesi indisi üzerindeki etkisinin geleneksel dağıtılmış üretim birimlerine oranla daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

Bajaj ve Singh (2019) farklı teknolojilere dayalı dağıtılmış üretim sistemlerinin güç kalitesi üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla simülasyon tabanlı bir araştırma yapmışlardır. Yapılan araştırma sonucunda geleneksel yakıtların kullanıldığı dağıtılmış üretim teknolojilerinde karşılaşılan güç kalitesi problemlerinin az olduğu,

buna karşın yenilenebilir tabanlı dağıtılmış üretim birimlerinin varlığında karşılaşılan güç kalitesi problemlerinin daha fazla olduğu anlaşılmıştır.

Razavi ve diğ. (2019) kapsamlı bir literatür çalışması yaparak dağıtılmış üretimin güç kalitesi üzerindeki olumlu ve olumsuz etkilerinden bahsetmiştir. Güç kaybının azalması, fosil yakıt tüketiminde önemli ölçüde azalma, sera gazlarının azalması, gerilim düşüşünün azalması, gerilim profilinde ve güç sistemi güvenilirliğinde iyileşmeler olumlu etkiler olarak verilmiştir. Dağıtım sistemlerindeki ünitelerin uygun olmayan şekilde yerleştirilmesi ve boyutlandırılması ciddi teknik zorluklara yol açabilir. Bu teknik zorluklar; gerilimde azalma, güç kaynağının güvenilirliği ve sistem kararlılığı ile ilgili problemler, koruma sistemi ve istenmeyen adalaşma şeklinde verilmiştir.

Bawa ve diğ. (2019) dağıtılmış üretim birimleri için doğru boyut ve konumu belirlemek amacıyla Genetik Algoritma Optimizasyonunu kullanmışlardır. Çalışmanın amacı dağıtılmış üretim birimleri için doğru boyut ve konumu belirleyerek oluşabilecek gerilim-frekans değişimlerinin, harmoniklerin ve güç kayıplarının önüne geçmektir.

Mahela ve diğ. (2020) güç sistemlerinde artan rüzgar enerjisi kaynaklarından ötürü güç kalitesi problemlerinin yaşandığını tespit etmişler ve bu nedenle güç sisteminde Stockwell'in dönüşümünü kullanarak rüzgar enerjisi kaynakları ile iç içe geçen güç sisteminde güç kalitesi değerlendirmesi konusunda önermede bulunmuşlardır.

Jasinski ve diğ. (2020) sanal bir güç santralinin çeşitli noktalarındaki güç kalitesini değerlendirebilmek için bir global güç kalitesi indisi önermişlerdir. Önerilen bu indisin farklı noktalardaki güç kalitesini hızlı ve kolay karşılaştırabilmek için uygun olduğunu gözlemlemişlerdir.

Dünyada tüketici sayısında yaşanan artış, sanayileşme, fosil enerji kaynaklarında yaşanan azalma ve geleneksel enerji kaynaklarının çevre ve insanlar üzerindeki olumsuz etkilerine paralel olarak alternatif enerji kaynaklarına yani yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgi artmıştır. Artan ilgiyle beraber dağıtılmış üretim kavramı ön plana çıkmıştır ve avantajları da göz önünde bulundurularak önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir. Dağıtılmış üretim, büyük bir merkezi güç sisteminin parçası

olmayan ve yüke yakın konumlandırılan geleneksel üretim birimlerine nispeten küçük bir elektrik enerjisi üretim birimi veya depolama kaynağı olarak tanımlanır.

Düşük yatırım maliyeti ve küçük boyutu nedeniyle dağıtılmış üretim, güç sistemi planlamasında önemli bir rol oynamaktadır. Ayrıca güçlenen şebeke yapısı dalga formu bozulmaları ve gerilim düşmeleri gibi güç kalitesi problemleri ile daha kolay mücadele edebilir. Ancak bu her zaman böyle değildir. Dağıtım şebekesine farklı tür ve teknolojilerdeki dağıtılmış üretim birimleri bağlandığında sorunlar da ortaya çıkabilir. Bunlar; generatörlerin devreye girip çıkması ile oluşan geçici darbeler, generatörün çıkış gücünde meydana gelen değişimin sebep olduğu gerilim dalgalanmaları ve tek fazlı generatörlerden kaynaklı dengesizlikler şeklinde sıralanır (Bracele ve diğ., 2011). Dağıtılmış üretimin güç sistemlerinde meydana getirdiği tüm bu olumlu ve olumsuz etkilerin analiz edilmesi gerekmektedir. Güç kalitesi seviyelerini analiz etmek için ise güç kalitesi indisi adı verilen göstergelere ihtiyaç duyulmaktadır.

Güç kalitesi indisleri, bozulma veya iyileşme durumlarındaki güç kalitesi seviyesini ölçmek için kullanılan nicel göstergelerdir. Bu indisler zaman ve frekans bilgisine dayanarak güç kalitesi konusunda bir ölçeklendirme yapmaktadır. Güç kalitesi indisleri genel olarak bölgesel ve sistem indisleri ile tekil ve global indisler olarak sınıflandırılmaktadır. Literatürde dağıtılmış üretimin şebekede var olduğu veya olmadığı durumlar için güç kalitesi indisleri üzerine yapılan çok sayıda çalışma mevcuttur (Caramia ve diğ., 2009; Dash ve diğ., 2012; Quintero-Molina ve diğ., 2015; Alfieri ve diğ., 2017; Elbasuony ve diğ., 2018; Sacasqui ve diğ., 2018; Jasinski ve diğ., 2020; Moghaddam ve diğ., 2020).

Caramia ve diğ. (2009) dağıtık üretimin mevcudiyetinde güç kalitesi seviyelerinin yeterli bir şekilde değerlendirmesi sorununu dikkate almış ve değerlendirmek amacıyla dağıtım ağları için uygun olasılıklı indisleri kullanmıştır. Bu indisler dağıtık üretimin varlığında ve yokluğunda da çeşitli güç kalitesi bozuklukları dikkate alınarak tanımlanmıştır.

Dash ve diğ. (2012) çalışmalarında dağıtılmış üretim sistemlerinde güç kalitesi indislerinin etkisini gözlemlemek için hem ada modu hem de ada modu dışı durumları

dikkate alarak Değiştirilmiş Özyinelemeli Gauss–Newton (MRGN) yöntemini önermişlerdir.

Quintero-Molina ve diğ. (2015) alışmalarında dağıtılmış üretimin, özellikle fotovoltaiik sistemlerin bir dağıtım ağının güç kalitesi ve güvenilirliği üzerindeki etkisini değerlendirmeyi amaçlayan bir yöntem önermişlerdir. Önerdikleri yöntem sistemin güvenilirliğini ölçen, sistem ortalama kesinti frekans (SAIFI) ve sistem ortalama kesinti süre (SAIDI) indisleri ile değerlendirilmiş bu değerlendirme gerilim düşmeleri ve dalgalanma göstergeleri gözden geçirilerek yapılmıştır.

Alfieri ve diğ. (2017) 0 ila 150 kHz dalga şekli bozulmalarının dağıtılmış üretimin var olduğu bir güç sisteminde analiz edilmesi amacıyla güç kalitesi indisleri önermişlerdir.

Elbasuony ve diğ. (2018) birleştirilmiş güç kalitesi indisini ve analitik hiyerarşi sürecini kullanarak dağıtılmış üretim sistemlerindeki güç kalitesini değerlendirmişlerdir. Yapılan analizler sonucunda hibrit bir sistemin güç kalitesi performansı açısından daha başarılı olduğunu gözlemlemişlerdir.

Sacasqui ve diğ. (2018) alışmalarında rüzgar barası, fotovoltaiik panelin bağlı olduğu bara ve yük baralarının güç kalitesi açısından değerlendirilebilmesi için gerilim ve akım harmonik bozulma oranları, gerilim düşmesi, frekanstaki sapma değeri ve fliker gibi güç kalitesi bozukluklarının belirlenmesi gerektiğini vurgulamışlardır. Bahsi geçen bu bozulma türlerinin hesaplanması için birleştirilmiş güç kalitesi indisini belirlemek için entropi ağırlıklı gri kümeleme algoritmasını kullanmışlardır.

Jasinski ve diğ. (2020) alışmalarında uzun vadeli güç kalitesi verilerini, küme analizi ve önerdikleri global güç kalitesi indislerine dayalı birleşik bir teknik kullanarak analiz etmişlerdir.

Moghaddam ve diğ. (2020) alışmalarında şebeke kayıplarının azaltılması ve güç kalitesinin iyileştirilmesi için dağıtım şebekesinde yeniden yapılandırma ve dağıtık üretimin tahsisi için yeni bir model önermişlerdir ve yeni ant lion optimizasyon (ALO) algoritmasını kullanarak kayıpları en aza indirmeyi ve güç kalitesi indislerini iyileştirmeyi amaçlamışlardır.

Bu tez çalışmasında, dağıtılmış üretim birimlerinin güç kalitesi üzerindeki olumlu ve olumsuz etkilerini araştırmak amacıyla güç kalitesi indislerinden faydalanılmıştır. DigSilent adı verilen güç sistemi analiz programı aracılığıyla gerçek bir test sistemi üzerinden analizler gerçekleştirilmiştir ve senkron generatör ve rüzgar çiftliğinin etkileri ile harmoniklerin etkileri gözlemlenmiştir.

Bu çalışmada güç kalitesi indisleri aracılığıyla dağıtılmış üretim birimlerinin sisteme entegrasyonu neticesinde baralardaki gerilim profilinde ve toplam harmonik distorsiyonunda (THD) iyileşmeler tespit edilmiştir. Senkron generatörün rüzgar çiftliğine kıyasla hem THD açısından hem de gerilim değişim indisi açısından daha fazla iyileştirme sağladığı tespit edilmiştir. Artan güç değerlerine bağlı olarak THD değişim ve gerilim değişim indislerinde meydana gelen iyileşmelerin arttığı gözlemlenmiştir.

Tez çalışmasının birinci bölümünde güç kalitesi indisleri başlığı altında güç kalitesi kavramı ve güç kalitesi bozulmaları, geleneksel güç kalitesi indisleri detaylı bir şekilde anlatılacaktır. İkinci bölümde dağıtılmış üretim ve dağıtılmış üretimin güç sistemlerindeki etkisini değerlendiren güç kalitesi değişim indislerinden bahsedilecektir. Üçüncü bölümde; yapılan benzetim çalışmaları ve elde edilen sonuçların niceliksel ve niteliksel değerlendirilmesi yapılacaktır. Sonuçlar ve öneriler bölümünde elde edilen sonuçlar yorumlanacak, çalışmanın bilime sağlayabileceği katkıları tartışılacaktır. Ayrıca gelecekte yapılacak çalışmalar için önerilerde bulunulacaktır.

1. GÜÇ KALİTESİ İNDİSLERİ

Dağıtılmış üretim kaynaklarının (DÜK) güç sistemlerinde var olduğu durumlarda güç kalitesi seviyelerini değerlendiren bir göstergeye ihtiyaç duyulmaktadır. Güç kalitesi indisleri, güç sistemlerinde herhangi bir sebeple meydana gelen güç kalitesi bozulmalarının veya iyileşmelerinin DÜK'lerin mevcudiyetinde ya da var olmadığı durumlardaki derecesini nicel olarak temsil etmek amacıyla kullanılan göstergelerdir (Shin ve diğ., 2006). Bu bölümde ilk olarak güç kalitesi indisleri aracılığıyla değerlendirmeye çalıştığımız güç kalitesi probleminin tanımından bahsedilecektir. Daha sonra sistemde gözlemlenen güç kalitesi bozulmalarından ve de standartlardan genel hatlarıyla bahsedilip güç kalitesi indisleri konusuna değinilecektir.

1.1. Güç Kalitesi

Güç kalitesi için yapılacak olan tanım, tanımı yapan kişinin üretici ya da tüketici olmasına bağlı olarak değişebilmektedir. Tüketici için şebekeye bağlanan yüklerin sorunsuz olarak çalışması şeklinde tanımlanabilirken üretici için ise güvenilir şekilde enerjinin iletilmesi olarak tanımlanabilir. Eğer genel bir tanımlama yapılacak olursa güç kalitesi, bir güç sisteminin davranışlarının farklı yönlerini ele alan temel işlevi ise son kullanıcıya kesintisiz olarak sabit şebeke frekansında ve sinüs dalga formunda bir enerjinin tedarik edilmesi olarak tanımlanmaktadır.

İdeal durumda bir şebekede kaynaktan elde edilen yani şebekeyi besleyen gerilim genlikleri fazlar için hemen hemen aynı değerdedir ve de fazlar arasında 120° fark bulunan sinüs dalga formundadır. Gerilimin bahsi geçen bu kriterler dışında değerler alması güç kalitesi bozukluklarına işaret eder. Gerilim dalgalanmaları, harmonikler, çentik, anlık gerilim kesintileri, gerilim darbesi, elektriksel gürültü gibi bahsi geçen güç kalitesi problemleri son kullanıcının cihazlarının ve sanayi sektöründe kullanılan hassas yüklerin zarar görmesine buna bağlı olarak da ciddi seviyelere ulaşan ekonomik kayıplara sebebiyet verebilmektedir. Daha da detaylandıracak olursak meydana gelen bu bozulmalar trafolar ve diğer hat ekipmanlarında aşırı ısınmalar neticesinde ömür kısalmasına, koruma ekipmanlarının hatalı çalışmasına, izolasyon ekipmanlarının

arızalanmasına, şebekeye bağlı cihazların devre dışı kalmasına neden olmaktadır. Bahsi geçen problemleri ortadan kaldırmak için ilk olarak meydana gelen bozulmaların sebeplerini ortaya çıkarmak mecburidir. Bu noktada ise bozulmaların doğru bir şekilde kategorize edilmesi gerekmektedir. Böylece meydana getirdikleri etkiler de tanımlanabilir. Sonuç olarak sorunun kaynağı belirlenip sorunun çözümüne yönelik metotlar önerilebilir.

IEEE 1159–2019 standardı bozulmaları yedi kategoriye ayırmaktadır. Bunlar; geçici olaylar, kısa süreli değişimler, uzun süreli değişimler, gerilim dengesizlikleri, gerilim işaretinin bozulması, gerilim dalgalanmaları ve güç frekansı değişimleridir (Caramia ve diğ., 2009). Söz konusu bozulmalar Tablo 1.1’de, nedenleri ise Tablo 1.2’de ayrıntılı bir şekilde verilmiştir.

Tablo 1.1. IEEE 1159–2019 standartına göre güç kalitesi bozulmalarının sınıflandırılması (IEEE Standards Board, 2019)

Kategorisi		Dalga Şekli İçeriği	Tipik Devam Süresi	Gerilim Genliği	
Geçici olaylar	Anlık darbeler	Nanosaniye mertebesi	5 ns yükseliş	<50 ns	
		Mikrosaniye mertebesi	1µs yükseliş	50 ns-1ms	
		Milisaniye mertebesi	0,1 ms yükseliş	>1 ms	
	Salınımlar	Düşük frekanslı	<5kHz	0,3-50 ms	0-4 pu
		Orta frekanslı	5-500 kHz	20 µs	0-8 pu
		Yüksek frekanslı	0,5-5 MHz	5 µs	0-4 pu
Kısa Süreli Etkin Değer (RMS) Değişimleri	Anlık değişimler	Gerilim Düşümü		0,5-30 periyot	0,1-0,9 pu
		Gerilim Yükselmesi		0,5-30 periyot	1,1- 1,8 pu
	3 saniyeye kadar olan değişimler	Kesintiler		30 periyot-3 s	<0,1 pu
		Gerilim Düşümü		30 periyot-3 s	0,1-0,9 pu
		Gerilim Yükselmesi		30 periyot-3 s	1,1- 1,4 pu

Tablo 1.1. (Devam) IEEE 1159–2019 standartına göre güç kalitesi bozulmalarının sınıflandırılması (IEEE Standards Board, 2019)

Kategorisi		Dalga Şekli İçeriği	Tipik Devam Süresi	Gerilim Genliği
1 dakikanın altındaki değişimler	Gerilim Dengesizliği		30 periyot- 3 s	%2- %15
	Kesintiler		3s -1 dk	<0,1 pu
	Gerilim Düşümü		3s -1 dk	0,1-0,9 pu
	Gerilim Yükselmesi		3s -1 dk	1,1- 1,2 pu
	Gerilim Dengesizliği		3s -1 dk	%2- %15
Uzun Süreli RMS Değişimleri	Kalıcı Kesintiler		>1 dk	0,0 pu
	Düşük Gerilim		>1 dk	0,8-0,9 pu
	Aşırı Gerilim		>1 dk	1,1- 1,2 pu
	Aşırı yüklenmeden kaynaklı akım		>1 dk	
Dengesizlik	Gerilim		Sürekli Durum	%0,5-%5
	Akım		Sürekli Durum	%1,0-%3,0
Dalga Şekli Bozulması	Doğru Akım (DC) Offset		Sürekli Durum	%0-%0,1
	Harmonikler	0-9 kHz	Sürekli Durum	%0-%20
	Ara Harmonikler	0-9 kHz	Sürekli Durum	%0-%2
	Çentikler		Sürekli Durum	
	Gürültü	Geniş band	Sürekli Durum	%0-%1
Gerilim Dalgalanmaları		<25 Hz	Aralıklarla Oluşur	%0,1-%7 0,2–2 P _{st}
Güç Frekansı Değişimleri			<10 s	± 0,10 Hz

1.2. Geleneksel Güç Kalitesi İndisleri

Güç sistemlerinde dağıtılmış üretimin mevcudiyetinde veya yokluğunda güç kalitesi seviyesini yeterince değerlendiren bir tanım geliştirme problemi güç kalitesi indislerini kullanma ihtiyacını doğurmuştur.

Tablo 1.2. Güç kalitesi problemlerinin detaylı incelenmesi

Kategori	Tanım	Muhtemel Neden	Problemin Etkisi	Korunma Yöntemleri
Anlık darbeler	Anlık darbeler, akım veya gerilimin kararlı durumunda polaritede tek yönlü olan (esas olarak pozitif veya negatif) ani bir değişikliği ifade etmektedir.	En yaygın nedenleri yıldırımlardır.	Yıldırım bir hatta düştüğünde anlık bir darbe indüklenir. Gerilim dalga formunda ani bir artış ve ardından ani bir düşüş ile nispeten küçük bir genliğe sahip bir salınım meydana gelmektedir.	Dirençli devre elemanları tarafından çabucak sönmelenmektedir.
Geçici olaylar	Anlık darbelerin aksine salınımlar, polaritede çift yönlü olan (hem pozitif hem negatif) gerilimde, akımda veya her ikisinde de meydana gelebilen ani değişikliklerdir. Salınımlar tepe değerleri, devamlılık süreleri ile frekans spektrumları aracılığıyla karakterize edilirler (Küçükilhan, 2017).	Genellikle yük tarafından kapasitörün anahtarlama yapmasından ve salınımlar güç sistemlerinde büyük ölçekli yüklerin devreye alınması ve devreden çıkarılması durumlarında ya da üretim tüketim dengesinde yaşanan ani ve büyük miktardan bozulmalardan kaynaklanır (Tekdemir ve Alboyacı, 2014).	Düşük frekans ve küçük genlikteki salınımlar, sönmelenmediği takdirde, iletim kapasitesini sınırlandırır, sonuç olarak güç sisteminde kararsızlığa neden olur (Keleş ve Kaygusuz, 2011).	Enerji kalitesi düzenleyicisi olan FACTS sistemleriyle sönmelenendirilebilir.

Tablo 1.2. (Devam) Güç kalitesi problemlerinin detaylı incelenmesi

Kategori	Tanım	Muhtemel Neden	Problemin Etkisi	Korunma Yöntemleri
Kesintiler	Kesintiler diğer güç kalitesi bozulmalarına kıyasla şebekede daha nadir gözlemlenen bir olaydır. Gerilim genliğinin en az yarım dalga boyunca sıfır değerini alması olarak tanımlanır.	Bu bozulma türü aşırı yüklenmelerden, ekipman arızalarından, arıza sonrası tekrar kapama durumlarından ve iletim kesintilerinden kaynaklanır (Nagarajan ve diğ., 2020).	Elektronik cihazların yanlış ya da hatalı çalışması ile şebeke kullanıcıları için yüksek ekonomik kayıplara sebep olabilir.	Kesintisiz güç kaynağı ve motor-generatör gruplarının kullanılması ile önüne geçilebilir.
Kısa süreli değişimler	Gerilim düşmesi gerilimin RMS değerinin yarım periyottan bir dakikaya kadar olan bir süre boyunca %10'a kadar olan düşmesini ifade eder.	Arıza akımları veya büyük motorların yol almasından kaynaklanmaktadır.	Bilgisayar ve kontrollerde kullanılan hassas devrelerin yanlış çalışması ve ekipmanların çökmesine neden olabilir (Olamaei ve diğ., 2016; Khadkikar ve Chandra, 2008).	Gerilim regülatörü, motor-generatör grubu ve statik düzenleyici kullanımı ile giderilebilir.

Tablo 1.2. (Devam) Güç kalitesi problemlerinin detaylı incelenmesi

Kategori	Tanım	Muhtemel Neden	Problemin Etkisi	Korunma Yöntemleri
Gerilim yükselmesi	Yarım döngüden bir dakikaya kadar bir süre boyunca gerilim genliğinin RMS değerindeki %10'dan daha büyük ani bir artışı ifade eder.	Büyük bir kapasitör bankasının veya yükün anahtarlanması ve sistem arıza koşullarından kaynaklanmaktadır.	Cihaz yalıtımı delinebilir.	Gerilim regülatörü, kesintisiz güç kaynağı ve motor-generatör grubu kullanılarak korunma sağlanabilir.
Kısa süreli değişimler	Gerilim dengesizliği, 3 fazlı sistemlerde faz büyüklüklerinin birbirine eşit olmaması veya faz farkının 120°'den farklı olması durumu olarak tanımlanır.	Tek fazlı yükler, tek fazlı DÜK'ler, asimetrik üç fazlı ekipmanlar ve cihazlar, dengesiz arızalar, elektrik konektörlerine kötü bağlantılar muhtemel nedenlerdir (Chen et al., 2009).	Sistemde ekstra güç kayıplarına, güvenlik problemlerine, motor arızalarına, ekipman ömrünün kısalmasına, röle arızalarına, hatalı ölçümlere ve trafo arızalarına neden olur (Chen et al., 2009).	Gerilim dengesizliğini önlemek için tüm planlama, tasarım, kurulum ve işletme aşamalarında dengesizlik sorununun dikkate alınması ile korunma sağlanabilir.

Tablo 1.2. (Devam) Güç kalitesi problemlerinin detaylı incelenmesi

Kategori	Tanım	Muhtemel Neden	Problemin Etkisi	Korunma Yöntemleri
Kalıcı kesintiler	IEEE 1159-2019 standartına göre güç sisteminde besleme geriliminin etkin değerinin 60 saniyeden daha uzun süreli olarak sıfır değerini alması olayıdır.	Kalıcı kesintiler genellikle ağaçların hat iletkenleri ile teması ve de koruma cihazlarının hatalı koordinasyonu sonucu oluşmaktadır (Cebrian ve diğ., 2018).	Elektronik cihazların yanlış ya da hatalı çalışması ile şebeke kullanıcıları için yüksek ekonomik kayıplara sebep olabilir.	Kesintisiz güç kaynağı ve motor-jeneratör gruplarının kullanılması ile önüne geçilebilir.
Uzun süreli değişimler	IEEE 1159 standartına göre düşük gerilimler tipik olarak gerilimin etkin değerinin nominal değerinden %80-%90'ı oranında 1 dakikadan daha uzun bir süreyle sapsması olarak tanımlanmaktadır.	Devrenin aşırı yüklenmesi veya şebeke sisteminde oluşan gerilim azalmaları düşük gerilimin nedenlerine birer örnek teşkil eder.	Aşırı motor akımı veya anormal gerilimden dolayı ekipmanlarda hata veya çökmeye neden olabilir.	Gerilim regülatörü, kesintisiz güç kaynağı ve hat düzenleyici kullanılarak önlenir.

Tablo 1.2. (Devam) Güç kalitesi problemlerinin detaylı incelenmesi

Kategori	Tanım	Muhtemel Neden	Problemin Etkisi	Korunma Yöntemleri
Aşırı gerilim	1 dakikadan daha uzun süre gerilimin nominal değerinden daha büyük bir değere sahip olmasıdır. Bu değer tipik olarak 1.1. ila 1.2 pu arasındadır (Hamdy ve diğ., 2012).	Sistemdeki yük değişimlerinden, yük anahtarlamaından veya transformatörün hatalı kademe ayarlamasından kaynaklanır.	Ekipmanların yalıtımı üzerinde kalıcı hasarlara neden olabilir. Transformatörlerde daha yüksek çekirdek kayıplarına neden olur.	Parafudr ve koruma elektrotlarının kullanımı ile aşırı gerilimlere karşı korunma gerçekleştirilebilir.
Uzun süreli değişimler	Aşırı akım, güç sisteminde yer alan elemanların nominal akım değerlerinden daha yüksek bir akıma sahip olması durumudur.	Güç sistemlerinde meydana gelen herhangi bir arızadan dolayı oluşur.	Aşırı ısı üretilmesi neticesinde yangın veya ekipmanlarda geri dönüşü olmayan hasarlara sebep olur.	Aşırı akım rölelerinin kullanımı ile korunma sağlanır.

Tablo 1.2. (Devam) Güç kalitesi problemlerinin detaylı incelenmesi

Kategori	Tanım	Muhtemel Neden	Problemin Etkisi	Korunma Yöntemleri
Dengesizlik	Üç fazlı bir güç sisteminde herbir faz için gerilim genliklerinin veya faz açılarının ya da her ikisinin de farklı değerler alması durumu dengesizlik olarak adlandırılmaktadır.	Tek fazlı yüklerin sisteme entegrasyonu dengesizliklere sebebiyet verir.	Meydana gelen bu dengesizlikler daha yüksek şebeke kayıplarına neticesinde de trafoların hasar görmesine neden olur (Girigoudar ve Roald, 2020).	Uygun sistem dizaynı ve uygun ekipman ve araçların kurulumu ile önlenebilir.
Gerilim işaretinin bozulması	Doğru Akım (DC) Offset	DC offset alternatif akım (AC) sisteminde doğru gerilim veya doğru akım bileşenin varlığını ifade eder.	Güç sisteminde doğrultucuların ve diğer elektronik anahtarlar cihazlarının çalışmasına neden olur.	-
	Harmonikler	Harmonikler, besleme sisteminin çalışmak üzere tasarlandığı frekansın katları olan frekanslara sahip periyodik gerilimler veya akımlar olarak tanımlanır.	Ark fırınları, gaz deşarjlı aydınlatma cihazları, güç dönüştürücüleri ve statik Var kompanzatorleri nedenleridir.	Hat düzenleyici filtreler ile korunma sağlanabilir.

Tablo 1.2. (Devam) Güç kalitesi problemlerinin detaylı incelenmesi

Kategorisi	Tanım	Muhtemel Neden	Problemin Etkisi	Korunma Yöntemleri
Gerilim işaretinin bozulması	Ara harmonikler	Güç sistemlerinde var olan doğrusal olmayan yüklerden kaynaklı olarak sistemden çekilen bozunumlu akımlar sebebiyle karşılaşılan bozulmalardır.	Etkileri ise akım ve gerilimde bozulma miktarını, ısı kaybını ve fliker seviyelerini arttırmıştır (Yu ve Yang, 2009).	-
	Çentikler	Çentik, AC-DC dönüştürücülerdeki komütasyon sürecinin neden olduğu faz-faz kısa devresinin bir sonucu olarak her döngüde meydana gelen periyodik bir geçici olaydır.	Komütasyon sırasında fazlar arası kısa devre oluşturan 3 fazlı 6 darbeli doğrultucudan kaynaklanır (Tan ve Ramachandaramurt, 2010).	Zayıf bir şebeke kaynağı, nispeten daha derin voltaj çentikğine neden olacağı için şebekenin güçlendirilmesi ile önenebilir.
Gürültü	Harmonikler, besleme sisteminin çalışmak üzere tasarlandığı frekansın katları olan frekanslara sahip periyodik gerilimler veya akımlar olarak tanımlanır.	Zayıf bağlantılar ve yetersiz topraklama nedenleri arasındadır.	Mikroişlemci temelli ekipmanların yanlış çalışmasına neden olur.	Yalıtım transformatörü ve kesintisiz güç kaynağı ile korunma sağlanabilir.

Tablo 1.2. (Devam) Güç kalitesi problemlerinin detaylı incelenmesi

Kategorisi	Tanım	Muhtemel Neden	Problemin Etkisi	Korunma Yöntemleri
Gerilim Dalgalanmaları	Gerilim genliğinin 0,95 ila 1,05 pu aralığını aşmadığı gerilim değışikliğidir (Dougherty ve Stebbins, 1997).	Sistemde meydana gelen gerilim dalgalanmalarının nedeni yükte meydana gelen hızlı değışmelerdir. Bu bozulma şekli en yaygın olarak ark fırınlarının kullanılması neticesinde gözlemlenir.	Bu dalgalanmalar titreşim (flikler) olarak bilinen ışık kaynaklarının aydınlatma yoğunluğunda değışikliklere neden olabilir (Gutierrez ve diğ., 2010).	Gerilim dalgalanmasını önlemek için sabit giriş ve çıkış voltajı oluşturan yüksek kaliteli ve yüksek performanslı stabilizatörler kullanılabilir.
Güç Frekans Değışimleri	Güç frekansı değışimi, güç sistemi temel frekansının belirtilen nominal değerinden sapmasını ifade eder. Güç frekansı değışiminin ana nedeni, aktif güç talebi ile güç üretimi arasındaki farktır.	Frekans değışimlerinin olması gereken aralığın dışına çıkması ile güç iletim sistemlerindeki hatalar, büyük bir yük bloğunun sistemden ayrılması ya da bir üretim kaynağının sistem dışı kalması nedenleridir (Sağlam, 2005).	Sistemde veri kaybına ve cihaz hasarlarına sebebiyet verebilir.	Üretilen güç ile talep edilen güç arasındaki uygun dengenin sağlanması ile engellenebilir.

Güç elektroniği cihazlarının ve elektrik şebekelerindeki diğer doğrusal olmayan yüklerin çoğalması, hem kamu hizmetleri açısından hem de güç sistemi kullanıcıları için güç kalitesi sorunları konusunda artan bir endişeyi tetiklemiştir. Güç bozukluklarının veya iyileşmelerinin boyutunun ve bunların güç sistemleri üzerindeki olumlu veya olumsuz etkilerinin ölçülmesi zaman veya frekans bilgisine dayanarak bir güç kalitesi olayının doğasını karakterize eden sayısal temsilciler olan güç kalitesi indisleri kullanılarak gerçekleştirilebilir.

DÜK'lerin varlığında veya yokluğunda şebekedeki bozunumların veya iyileşmelerinin derecesini ortaya koyan ve bu iki durum için kıyas yapmayı sağlayan göstergelere güç kalitesi indisleri adı verilmektedir. Güç kalitesi indisleri, güç kaynağının kalitesini ölçmek ve güç şebekesi üzerindeki farklı bozuklukların veya iyileşmelerin olumlu veya olumsuz etkilerini kıyaslamak için kullanılmaktadır. Literatürde güç kalitesi seviyelerinin değerlendirmesi sorununun hem geleneksel hem de yeni indisler kullanılarak çözülebileceği görülmüştür. Bu bölümde geleneksel indisler anlatılacaktır.

1.2.1. Gerilim düşmesi ve yükselmesi

Gerilim düşmesi, standartlar ile belirlenen süre boyunca gerilim büyüklüğünde yine standartlarda belirlenen büyüklükte meydana gelen bir azalma olarak tanımlanır ve en önemli ve yaygın olarak ortaya çıkan güç kalitesi sorunudur. Gerilim düşüşünü süre ve büyüklük açısından karakterize edecek tanımlar standartlara göre değişiklik göstermektedir. IEEE Std. 1159, 2019 standartına göre, gerilim düşüşü, RMS gerilim değerinin 0,1 pu'dan 0,9 pu'ya kadar 0,5 periyot ile 1 dakika süresi arasında azalması olarak tanımlanır. Gerilim düşüşüne, sistemdeki arızalar, trafoların enerjilendirilmesi veya büyük bir yükün anahtarlanması neden olur.

Normal gerilim sinyali yüzde 10 ila 90 oranında arttığında, meydana gelen güç kalitesi bozulması gerilim yükselmesi olarak bilinir.

1.2.2. Gerilim dengesizliği

Üç fazlı güç sistemlerinde üretilen gerilimler sinüzoidaldir; üç faza ait genlik değerleri ise birbirine eşittir ve fazlar arası 120°'lik bir fark mevcuttur; fakat çeşitli nedenlerden dolayı faz gerilimlerinin etkin değerleri ile faz açılarının eşit olmaması durumu yani

dengeşizlik diye adlandırılan bozulma türü meydana gelebilmektedir. (Jouanne ve diğ., 2001) Üç faz gerilim dengeşizliği, zayıf şebekelerde ve büyük tek fazlı yükleri besleyen güç sistemlerinde sık karşılaşılan bir güç kalitesi sorunudur. Gerilim dengeşizliğinin şiddeti genellikle negatif alternans gerilim bileşeni ile pozitif alternans gerilim bileşenlerinin birbirlerine oranı ile ölçülürken bu oran gerilim dengeşizlik faktörü olarak yüzde değer ile ifade edilmektedir. Aşağıda Eşitlik (1.1) ile bahsi geçen gerilim dengeşizlik faktörü hesaplanır.

$$K_d = \frac{V_{-1}}{V_{+1}} 100 \quad (1.1)$$

1.2.3. Harmonikler

Güç sistemlerinde değişken hızlı sürücüler, kişisel bilgisayarlar ve lineer olmayan elektronik aygıtlar gibi güç elektroniği kontrollü ekipmanların artan kullanımını harmonikler olarak adlandırılan bir tür gerilim ve akım dalga şekli bozulmasına yol açmaktadır. Harmonik frekansları temel frekansın tamsayı katları olan, bozulmuş bir periyodik dalga formunun istenmeyen bileşenleri olarak tanımlanabilir (Singh, 2009). Güç sisteminde karşılaşılan harmonik büyüklüklerin hesaplanması aşağıdaki eşitliklerle ayrıntılı bir şekilde verilmiştir (Kocatepe ve diğ., 2003).

Tablo 1.3. IEEE tarafından belirlenen harmonik bozulmalara ilişkin sınır değerler (Khalid ve Dwivedi, 2011)

Bara Gerilimi (V_n)	Tekil Harmonik Büyüklüğü (%)	THD (%)
$V_n \leq 69$ kV	3,0	5,0
69 kV < $V_n \leq 161$ kV	1,5	2,5
$V_n > 161$	1,0	1,5

Sistemde harmonik bileşenler barındıran gerilim ve akım değerlerinin ani değerleri fourier serisine açılarak aşağıdaki Eşitlik (1.2) ve (1.3) ile ifade edilir.

$$V(t) = \sum_{n=1}^{\infty} V_n(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} V_n \sin(n\omega_1 t + \theta_n) \quad (1.2)$$

$$i(t) = \sum_{n=1}^{\infty} i_n(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} I_n \sin(n\omega_1 t + \delta_n) \quad (1.3)$$

Yukarıdaki Eşitlik (1.2) ve (1.3)'te geçen V_n ve i_n n. harmonikli gerilim ve akıma ait ani değerlerdir. Gerilim ve akım değeri sonsuz sayıda fourier serisine açılımdan meydana gelir. V_n ve I_n ise n. harmonik mertebesi için gerilim ve de akımın efektif değerlerini ifade ederken w_1 , temel bileşene ait açısal hızı ifade eder. θ_n ile δ_n açıları ise sırasıyla gerilim ve akım için faz farkı açısıdır.

Standartta yaygın bir şekilde kullanılan harmonik büyüklükleri sınırlamayı amaçlayan gerilim ve akıma ait THD için formüller aşağıda Eşitlik (1.4) ve Eşitlik (1.5)'te verilmiştir.

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \quad (1.4)$$

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (1.5)$$

Eşitlik (1.4) ve (1.5)'te görülmektedir ki bir sinyaldeki THD değeri hesaplanırken harmonik bileşenlerin efektif değerleri temel bileşenin efektif değerine oranlanır ve de çoğunlukla yüzde değeriyle ifade edilir. Böylelikle sinyalin temel bileşenden sapma miktarı tespit edilmiş olur. Aynı şekilde n. mertebeden harmonik için akım ve gerilim tekil harmonik distorsiyonları aşağıda Eşitlik (1.6) ve (1.7)'de verilmiştir.

$$HD_V = \frac{V_n}{V_1} \quad (1.6)$$

$$HD_I = \frac{I_n}{I_1} \quad (1.7)$$

1.2.3.1. Toplam talep distorsiyonu (TTD)

Bir yüke ait değer olan toplam talep distorsiyonu aşağıdaki gibi Eşitlik (1.8) ile tanımlanmaktadır.

$$TTD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_L} \quad (1.8)$$

Eşitlikte yer alan I_L değeri güç sisteminin besleme noktasından bir yük tarafından çekilen temel frekansa sahip maksimum akım değeridir.

1.2.3.2. Telefon etkileşim faktörü (TEF)

Güç sisteminde harmonik akım ve gerilimden kaynaklanan telefon gürültü değerinin tespit edilmesine yarayan bir eşitliktir. Telefon etkileşim faktörü (TEF) gerilim ve akım büyüklükleri için aşağıdaki Eşitlik (1.9) ve (1.10)'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$TEF_V = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} (w_n V_n)^2}}{V_{ef}} \quad (1.9)$$

$$TEF_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} (w_n I_n)^2}}{I_{ef}} \quad (1.10)$$

Eşitliklerde yer alan w_n n. mertebeden harmonik için endüktif ve de işitsel etkisini hesaba katmaya yarayan bir kat sayısını ifade eder.

2. DAĞITILMIŞ ÜRETİM

Mevcut şebekelerde gücün son kullanıcıya tedariki, merkezi üretim sistemi üzerinden gerçekleştirilir. Bu sistem; geleneksel üretim santralleri aracılığıyla üretim, uzunluğu kilometreleri bulan hatlar aracılığıyla iletim, radyal tipteki şebekeler ile dağıtım işlevi olmak üzere üç görevi gerçekleştirir (Basa Arsoy ve Perdahçı, 2004).

Uzun yıllar boyunca geleneksel büyük güçlü santraller hangi kaynağa ihtiyaç duyularsa o kaynağın yoğun olduğu yerlerde kuruluyordu. Böyle bir durumda santrallerin kurulduğu yerler ile tüketicinin bulunduğu yerleşim yerleri arasındaki mesafe genellikle çok fazla oluyordu. Bu koşullar da gerilim düşümlerini ve hat kayıplarını azaltmak için yüksek gerilim seviyesinde enerji iletimini zorunlu kılıyordu. Ancak bu yapıda (I) artan enerji ihtiyacı ve mevcut şebekelerin bu ihtiyacı karşılamada yetersiz kalması, (II) coğrafyanın getirmiş olduğu kısıtlamalar, (III) mevcut şebekenin korunma sistemlerinin getirdiği yüksek ekonomik külfet, (IV) artan kısa devre akımları, (V) Güç talebini karşılamak için gerekli olan yatırım ihtiyacı, (VI) özelleştirme sonucu oluşan rekabetçi piyasa, (VII) sağlanabilecek ekolojik faydalar ve akılcı üretim teknikleri nedenlerinden ötürü değişim kaçınılmaz olmuştur (Hadjsaid ve diğ., 1999). Tüm bunların neticesinde dağıtılmış üretim kavramı ortaya çıkmıştır.

Dağıtılmış üretim terimi genellikle küçük ölçekli elektrik üretimini tanımlamak amacıyla kullanılmasına rağmen bu terimin net bir tanımının yapılması konusunda bir fikir birliğine varılamamıştır; fakat genellikle dağıtım şebekesinden güç sistemine bağlı 10 MVA gücünün altındaki üretim kaynakları için dağıtılmış üretim terimi kullanılmaktadır (Cansever, 2015). Geleneksel büyük güçlü üretim santrallerinden farklı olarak dağıtılmış üretim santrallerinin var olduğu bir şebekede üretim birimleri ile tüketiciler birbirine yakındır yani enerjinin yerel olarak tüketim noktasında üretilmesine olanak verir. Böylece üretim-iletim-dağıtım silsilesindeki iletim kısmı çıkartılarak üretimden sonra doğrudan dağıtım gerçekleştirilebilmektedir (Çakal, 2012). Sonuç olarak iletim kayıpları azalırken dağıtılmış üretim de önemli hale gelmiştir. Dağıtılmış üretimin getirdiği avantajlar:

- iletim sistemindeki yükün azalması neticesinde azalan iletim kayıpları ve düşen iletim hattı maliyetleri,
- çeşitli güç aralığında olabilmesi sebebiyle enerji piyasası aktörlerine finansal güçleri oranında yatırım yapma fırsatı sunması,
- azalan hat kayıpları
- puant değerini aşağıya çekilmesi,
- geleneksel üretim şekline farklı olarak alçak ya da orta gerilim mertebesinde güç sistemine bağlanan üretim birimleri ile daha gelişmiş bir enerji üretimi sağlanması,
- geleneksel santrallere göre küçük boyutları ve kolay inşa edilmeleri yani kolay kurulum avantajları ve geleneksel üretim santrallerine göre toplamda daha düşük maliyet gerektirmeleri şeklinde sıralanabilir.

Dağıtılmış üretimle ilgili teknik konular dağıtılmış üretim birimlerinin gücüne göre değişebileceği için dağıtılmış üretimi kategorilere ayırarak tanıtmak uygun olur. Bu kategorilerin:

- 1-5 kW aralığındaki dağıtılmış üretim birimleri mikro ölçek,
- 5 kW-5 MW aralığındaki dağıtılmış üretim birimleri küçük ölçek,
- 5-50 MW aralığındaki dağıtılmış üretim birimleri orta ölçek,
- 50 MW'tan büyük olanlar ise büyük ölçek olmak üzere tanıtılması uygun olacaktır (Ackermann ve diğ., 2001).

Bu bölümde dağıtılmış üretim teknolojileri ve bu teknolojilerin güç kalitesi indisleri üzerindeki etkileri incelenecektir.

2.1. Dağıtılmış Üretim Teknolojileri

Son yıllarda güneş panelleri, rüzgar türbinleri, yakıt pilleri, mikro türbin vb. dağıtılmış üretim teknolojileri, güç sistemindeki kısıtlamalar ve iletim kapasitelerinin yetersizliği nedeniyle büyük ilgi görmektedir. Güç kayıplarını en aza indirmek, gerilim profilini ve güvenilirliği iyileştirmek gibi maksimum potansiyel sağlayacak adımlar, güç sistemlerinde dağıtılmış üretimin optimum şekilde yerleştirilmesi ve boyutlandırılmasıyla elde edilebilir (Godha ve diğ., 2020).

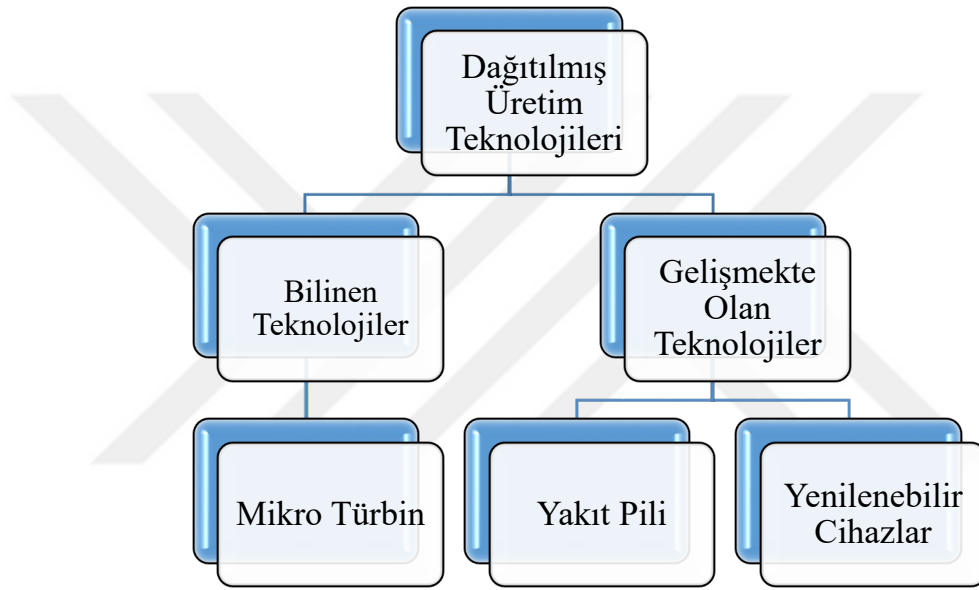
Günümüzde güç sistemi alanındaki geniş uygulama yelpazesinin ihtiyaçlarını karşılamak için farklı dağıtılmış üretim teknolojileri kullanılmaktadır. Bu

teknolojilerin uygulama metotları ise farklı yük gereksinimlerine göre birbirinden farklılaşmakta sonucunda ise kullanılan dağıtılmış üretim türleri etkilenmektedir. Dağıtılmış üretim teknolojileri için değişen uygulama metotlarından bazıları aşağıda verilmiştir (El-Khattam ve Salama, 2004).

- Yedek güç: Bu uygulama metodunda dağıtılmış üretim birimleri kesintiyi tolere edemeyen halk sağlığı ve güvenlik durumları ya da kesintinin büyük ekonomik kayıplara yol açabileceği sistemler için yedek güç kaynağı olarak kullanılır.
- Bağımsız çalışma: Özellikle izole alanlar yani uzak ve erişilmesi güç coğrafi koşulların mevcut olduğu durumlarda şebekeye bağlantının geleneksel santrallere kıyasla ekonomik boyutunun düşük olmasından ötürü dağıtılmış üretimin güç sağlayıcı olarak tercih edildiği uygulamadır.
- Azami yük paylaşımı: genellikle doğal gaz, dizel, petrol yakıtların kullanıldığı bu uygulama elektrik kullanımının en yüksek olduğu zamanlarda tedarik güvenliği sağlar ve özellikle de büyük endüstriyel müşteriler için elektrik maliyetini düşürür.
- Kırsal ve uzak uygulamalar: Bu uygulama ile dağıtılmış üretim kırsalda kalan uzak noktalardaki tüketicilerin ısınma, soğutma, iletişim, aydınlatma gibi ihtiyaçlarına cevap verirken küçük endüstriyel proseslerin enerji talebini şebekeden bağımsız olarak karşılayabilir.
- Birleşik ısı-güç üretimi sağlama: Kojenerasyon olarak adlandırılan aynı anda ısı ve güç sağlayan, yüksek enerji kullanım verimliliğine sahip bir uygulama metodudur. Yakıtı elektrik enerjisine dönüştürürken elde edilen atık ısıyı da hastanelerde, geniş ticari alanlarda ve proseste bir yan ürün olarak kullanır.
- Temel yük: Bu uygulamada dağıtılmış üretim birimleri genellikle gerekli temel yükün bir kısmını sağlayıp gerilim profilini iyileştirir, güç kayıplarını azaltır ve sonucunda güç kalitesini iyileştirip bunu sistemi desteklemek için kullanır.
- Dağıtılmış üretim kapasiteleri: Dağıtılmış üretim kapasiteleri kullanıcı türüne ve kullanılan uygulamalara bağlı olduğundan bu kavram için genel bir tanım yapılamamaktadır. Ancak kullanılan güce bağlı sınıflandırmaya göre mikro, küçük, orta ve büyük olmak üzere dörde ayrılır.
- Üretilen enerji tipi: Üretim sonucundaki çıkış elektrik akımı doğru veya alternatif olabilir. Fotovoltaik paneller, yakıt pilleri doğru akım üretirler ve elde edilen enerji alternatif akıma dönüştürülerek kullanılabilir. Rüzgar türbinleri ise doğrudan alternatif akım üretirler.

- Teknoloji: Dağıtılmış üretim kullanılan yakıt tiplerine göre ikiye ayrılmaktadır. Dağıtılmış üretim birimlerinde fosil ya da fosil olmayan yakıt sınıfları kullanılmaktadır.

Yukarıdaki maddeleri incelediğimizde teknolojilerin sınıflandırılmasının yakıt tiplerine göre yapıldığı görülmüştür fakat gelişen teknoloji ile birlikte kullanıcıları yakıt tiplerine göre sınıflandırmadan ziyade alışlagelmiş ve gelişmekte olan teknolojiler şeklindeki sınıflandırma ilgilendirmektedir. Bu sınıflandırma Şekil 2.1’de verilmiştir.



Şekil 2.1. Dağıtılmış üretim teknolojileri (Basa Arsoy ve Perdahçı, 2004)

Şekil 2.1’de verilen sınıflandırma alt başlıklarda ayrıntılarıyla anlatılacaktır.

2.1.1. Mikro türbinler

Doğal gaz ya da fuel-oil gibi fosil yakıtlar ile çalışabilen küçük kapasiteli yanma türbinleridir. Basit bir biçimde bir kompresör, yanma odası, reküperatör, küçük türbin ve generatörden oluşurlar (El-Khattam ve Salama, 2004). Geleneksel yanmalı motorlara göre hacim olarak küçük ölçeklidirler ve hafiftirler. Özellikle alan sınırlamaları olan sahalarda kurulabilirler. Güçleri 20 kW ile 500 kW aralığında değişmektedir. Yüzde 80’e varan bir verim ile çalışmaktadırlar. Büyük ölçekli türbinlere göre düşük emisyon açığa çıkarırlar. Kolayca çalıştırılabilirler ve basit

tasarımları nedeniyle daha az bakım gerektirirler. Diğer dağıtılmış üretim teknolojileri ile kıyaslandığında kurulum maliyeti düşüktür.

2.1.2. Yakıt pilleri

Yakıt pilleri, elektrik enerjisi üretmek ve elektrokimyasal işlemlerle kimyasal enerjiden ısı enerjisi sağlamak için kullanılan bir cihazdır. Kimyasal enerjiden yüzde 60 gibi yüksek bir verimlilikle elektrik enerjisi üretirler. Enerji üretimi sırasında bir yanma olayı olmaması sebebiyle ihmal edilebilir oranda CO₂ salınımı gerçekleştirirler. Haliyle çevre dostu bir elektrik enerjisi üretimi gerçekleştirilmiş olur. Elektrik ve ısı gibi çift yönlü enerji ürettikleri için tercih sebebi oluştururlar.

2.1.3. Yenilenebilir enerji kaynakları

Yenilenebilir enerji özellikle güneş, rüzgar ve su gibi yenilenebilir kaynaklardan elde edilen temiz enerjidir. Genel olarak dağıtılmış üretim için kullanılan yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanıldığı teknolojiler fotovoltaikler ve rüzgar türbinleridir.

Fotovoltaikler üzerine düşen güneş ışınlarını herhangi bir hareketli parça olmadan direkt olarak elektrik enerjisine çeviren yarı iletken teknolojisi ile çalışan cihazlardır. Fotovoltaik hücreye çarpan güneş ışınları yapıldığı yarı iletken malzeme tarafından fotovoltaik etki yoluyla soğrulur. Soğrulan bu ışınlar yarıiletken malzemedeki elektronların gevşemesine neden olur. Fotovoltaik malzemedeki oluşan elektrik alanı gevşeyen bu elektronların güneş hücresi boyunca bir yönde akmasını ve bir elektrik akımı oluşturmasını sağlar.

Tükenmez bir enerji kaynağı olarak bilinen rüzgar enerjisi atmosferdeki hava akımının sahip olduğu kinetik enerjidir. Bu kinetik enerji rüzgar türbinleri aracılığıyla önce mekanik enerjiye daha sonra da elektrik enerjisine dönüştürülür. Rüzgar türbini teknolojisi ise ortaya çıkan en önemli yenilenebilir teknolojilerden biridir. 1980'lerde kilowattlar mertebesinde elektrik enerjisi üretimine başlanan rüzgar türbinlerinden bugün megawattlar mertebesinde güç üretilmektedir. Sisteme dahil oldukları ilk dönemlerde ürettikleri güç miktarlarıyla güç sistemleri üzerinde pek de etkin olmayan rüzgar enerjisi bugün şebekeye sağladığı güç ile şebekede aktif bir role sahiptir (Guerro ve diğ., 2010). Rüzgar türbinleri generatör, rotor, kanatlar, tahrik cihazı, şaft

ve nacelleden oluşur. Rüzgar türbin kanatlarını döndürür ve bunlar da bağlı oldukları şaftı döndürür. Bu şaft, generatörü çalıştırarak elektrik üretir. Rüzgar enerjisinin beraberinde getirdiği avantajları: I) Fosil yakıtların neden olduğu küresel ısınmanın aksine şebekeye temiz bir enerji tedarik etmesi, II) Nükleer enerji gibi radyoaktif atık oluşturmaması, III) Sürdürülebilir bir enerji çeşidi olması, IV) Geleneksel yakıt maliyetleri zamanla artarken rüzgar enerjisinde böyle bir durumun söz konusu olmaması şeklinde sıralanabilir.

2.2. Dağıtılmış Üretim Güç Kalitesine Etkisi

Artan nüfus ve kentleşme ile birlikte elektriğe olan talep de gün geçtikçe artmaktadır. Bu talebi karşılamak için temiz ve çevre dostu DÜK'lere ihtiyaç duyulmuştur ve bu kaynaklar güç sistemlerine entegre edilmiştir. Dağıtılmış üretim ile besleme gerilimi iyileştirilir, trafoların aşırı yüklenmesinin önüne geçilir, temiz bir enerji kaynağından elektrik enerjisi üretilir. Bu bölümde dağıtılmış üretimin güç kalitesi üzerindeki etkileri verilmiştir.

Dağıtılmış üretimin dağıtım sistemlerinde yaygınlaşması ve sürekli iyileştirilmesi ile şebeke üzerindeki etkileri daha önemli hale gelmiştir. Dağıtılmış üretim bir yandan şebekenin güçlenmesine ve kayıpların azalmasına katkı sağlarken diğer yandan ise önemli etkiler doğurabilecek güç kalitesi problemlerine sebep olabilir. Bu problemler; dağıtım şebekelerinde generatörün çıkış gücündeki değişimden kaynaklanan gerilim dalgalanmaları, tek fazlı generatörlerin sebep olduğu dengesizlikler, generatörlerin devreye girmesi ve çıkması sonucu oluşan geçici darbeler, gerilim düşmeleri gibi bozulmalara sebep olan kısa devre akımları şeklinde ortaya çıkabilir. Burada amaç ortaya çıkan bu güç kalitesi problemlerini çözümlenektir. Problemlerin çözümü için dağıtılmış üretimin güç kalitesi üzerindeki etkilerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu etkilerin doğru bir şekilde tespit edilebilmesi için güç kalitesi indislerinden faydalanılması gerekir. Bu aşamada iki temel yaklaşım kullanılır:

- Dağıtılmış üretim birimlerinin sisteme entegrasyonundan önce yapılan incelemedir. Bu aşamada dağıtılmış üretim birimlerinin büyüklüğüne ve bağlantı noktalarına karar vermek için analizler gerçekleştirilir.)

- Dağıtılmış üretim birimlerinin sisteme entegrasyonundan sonra yapılan incelemedir. Bu aşamada güç kalitesindeki bozulmalar için sınır değerler belirlenir. Eğer bu

değerler kabul edilemez sınırlarda ise bu değerlerin düzeltilmesi için gerekli kararlar alınır.

2.2.1. Güç kalitesi değişim indisleri

Geliştirilen değişim indisleri belirli bir devre alanı için hizmet kalitesinin değerlendirilmesine yardımcı olmak üzere tasarlanmıştır. İndisler, değişen büyüklükteki sistemlere uygulanabilecek şekilde tanımlanır. Örneğin indisler, bir dağıtım şirketinin tüm dağıtım sisteminde kaydedilen ölçümlerine uygulanabilir ve sonuçta sistem ortalamaları elde edilir veya indisler, dağıtım sisteminin tek bir fideri veya tek bir müşteri ortak bağlantı noktası gibi daha küçük bir bölümüne uygulanabilir (Brooks ve diğ., 1998). İndislerin bu ölçeklenebilirliğinin bir sonucu olarak, dağıtım sisteminin çeşitli bölümleri için değerler hesaplanabilir ve bu değerler tüm sistem için hesaplanan değerlerle karşılaştırılabilir.

Yukarıda bahsi geçtiği üzere dağıtılmış üretimin sisteme entegrasyonundan önce ve sonra elde edilen güç kalitesi indisleri matematiksel olarak karşılaştırılarak değişim indisleri hesaplanır. Değişim indisleri ise iki başlık altında toplanır. Bunlardan ilki, geleneksel indislerden faydalanarak hesapladığımız her bir güç kalitesi bozukluğunu tek tek ele alan tekil değişim indisleri, ikincisi ise birden fazla güç kalitesi bozukluğunu eş zamanlı olarak ele alan global değişim indisleridir. Her iki tip için de genel bir güç kalitesi indisi değerlendirilirken bahsi geçen indis X olarak isimlendirildiğinde, dağıtılmış üretimin kurulumu nedeniyle güç kalitesi değişim indisi olarak adlandırılan X_D aşağıdaki gibi Eşitlik (2.1) ile hesaplanır.

$$X_D = \frac{X_E - X_Y}{X_E} 100 \quad (2.1)$$

Eşitlikte geçen;

- X_E : Dağıtılmış üretimin kurulmadan önce tekil ya da global X indisinin değeridir.
- X_Y : Dağıtılmış üretimin kurulumundan sonra tekil ya da global X indisinin değeridir.

Eşitlik (2.1) dağıtılmış üretim birimlerinin sisteme entegrasyonundan kaynaklanan artışın veya azalışın miktarının belirlenmesine izin verir. Eşitlik (2.1) üzerinden

değerlendirilecek bazı bölge ve sistem indisleri tekil değişim indisleri dikkate alınarak açıklanmıştır.

2.2.1.1. Tekil değişim indisleri

Tüm güç kalitesi bozukluklarına ilişkin tekil değişim indisleri elde edilebilir fakat bu çalışmada sadece harmonik bozulmalar ve gerilim değişimleriyle ilgili indisler değerlendirilecektir.

2.2.1.1.1. Harmonikler

Dağıtılmış üretimin sisteme entegrasyonundan önce ve sonra elde edilen güç kalitesi indisleri güç kalitesi konusunda karar alabilmek için kıyaslanmalıdır. Bu amaçla harmonik varyasyon indislerinden yararlanılır. Harmonik varyasyon indisleri (bölge indisleri) Eşitlik (2.2) ile aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$THD_{Dj} = \frac{THD_{Ej} - THD_{Yj}}{THD_{Ej}} 100 \quad (2.2)$$

Yukarıdaki eşitlikte geçen THD_{Dj} yeni bir dağıtılmış üretim biriminin sisteme entegrasyonundan kaynaklı j. baradaki THD değişim indisini ifade eder. Eşitlikte geçen THD_{Yj} sisteme yeni entegre edilen dağıtılmış üretim biriminden sonra j. baradaki THD'yi ifade eder. THD_{Ej} ise dağıtılmış üretim birimi sisteme entegre edilmeden önceki THD değerini ifade eder.

Sistemde bir iyileşmenin yaşandığını söyleyebilmek için THD_{Dj} değerinin pozitif değer alması gerekmektedir. Aksi halde güç kalitesi performansı açısından olumsuz bir durumun meydana geldiği kanıtlanmış olur.

2.2.1.1.2. Gerilim düşmesi

Gerilim düşmesi indisleri de tıpkı THD indisleri gibi güç kalitesi konusunda karar almak için gereklidir. Gerilim düşme varyasyon indisi Eşitlik (2.3)'teki gibi hesaplanır.

$$VDA_{Dj} = \frac{VDA_{Ej} - VDA_{Yj}}{VDA_{Ej}} 100 \quad (2.3)$$

Yukarıdaki eşitlikte geçen VDA_{Ej} yeni bir dağıtılmış üretim biriminin sisteme entegrasyonundan önce j. baradaki gerilim düşme indisi değeri iken VDA_{Yj} yeni bir dağıtılmış üretim biriminin sisteme entegrasyonundan sonraki j. baradaki gerilim düşme indisi değeridir. VDA_{Dj} değeri ise gerilim düşmesinde yaşanan değişimi ifade eden indistir. THD_{Dj} indisinin aksine VDA_{Dj} indisinin negatif değer alması ilgili barada güç kalitesi performansı açısından bir iyileşmenin yaşandığının kanıtıdır.

2.2.1.2. Sistem indisleri ve sistem değişim indisleri

Güç sistemleri için her bir geleneksel güç kalitesi indisi sistemde var olan her bir bara için ayrı ayrı hesaplanabilir. Fdeğişüç kalitesi indisinin tüm sistem için hesaplanması sonucu elde edilen indislere sistem indisleri adı verilir. Sistem indisleri tüm güç kalitesi bozuklukları için hesaplanarak güç sisteminin güç kalitesi konusunda genel bir değerlendirmesi yapılabilir. Aşağıda bazı geleneksel indislere ait sistem indisleri tanımlanmıştır.

Sistem indislerini açıklamadan önce indislerin hesaplanmasında kullanılan temel parametreler verilecektir. Bunlardan ilki k. baranın ağırlık faktörü (ilgili bara yükünün sistemin toplam yüküne bölünmesiyle elde edilir) olan w_k 'dir. M ise sistemde gözlemlenen toplam yük barası sayısıdır.

Sistem gerilim düşme indisi olan SVDA Eşitlik (2.4)'te verilmiştir.

$$SVDA = \frac{\sum_{k=1}^M w_k VDA_k}{\sum_{k=1}^M w_k} \quad (2.4)$$

Yukarıdaki eşitlikte geçen VDA_k k. baradaki gerilim düşme indisini ifade eder.

Sistem THD indisi olan STHD Eşitlik (2.5)'te verilmiştir.

$$STHD = \frac{\sum_{k=1}^M w_k THD_k}{\sum_{k=1}^M w_k} \quad (2.5)$$

Yukarıdaki eşitlikte yer alan THD_k k. baradaki THD indisini ifade eder.

Yukarıda hesaplanan sistem indislerinden faydalanılarak dağıtılmış üretimin bu indislere etkisini belirlemek için değişim indislerinden yararlanılır. Değişim indislerini hesaplamak için Eşitlik (2.1) kullanılır. Sistemin THD değişim indisi $STHD_D$ Eşitlik (2.6)'ya göre hesaplanır. Böylece dağıtılmış üretimin sistem indisleri üzerindeki etkisi belirlenebilir.

$$STHD_D = \frac{STHD_E - STHD_Y}{STHD_E} 100 \quad (2.6)$$

Yukarıdaki eşitlikte geçen $STHD_E$ dağıtılmış üretim birimi sisteme entegre edilmeden önceki sistem THD indisi iken $STHD_Y$ dağıtılmış üretim birimi sisteme entegre edildikten sonraki sistem THD indisidir. $STHD_D$ değerinin pozitif değer alması güç sisteminde güç kalitesi performansı açısından iyileşmenin yaşandığını ifade eder.

3. BENZETİM ÇALIŞMASI

Güç sistemlerinde en çok karşılaşılan bozulmalar gerilim düşmesi ve harmoniklerdir. Her iki güç kalitesi probleminin mutlaka ele alınması gerekmektedir. Tez çalışmasının bu bölümünde söz konusu bozulmaların iyileştirilmesi ve dağıtılmış üretim birimlerinin güç kalitesi üzerindeki etkilerinin araştırılması amacıyla indisler kullanılarak yapılan benzetim çalışması ayrıntılı bir şekilde anlatılmıştır. Alt bölümlerde sırasıyla test düzeneği ve bu düzeneğe ait temel bilgiler, güç kalitesini değerlendirmek amacıyla kullanılacak DÜK'ler, yapılan analizler, benzetim çalışmaları ve güç kalitesi açısından elde edilen sonuçlar verilmiştir.

3.1. Test Düzeneği

Deneysel çalışmaların gerçekleştirilmesi adımıında gerçek bir test düzeneği olan İzmit 2 Trafo merkezinin Rabak fideri kullanılmıştır. Sistemin tek hat şeması yük değerleri ile birlikte Şekil 3.1'de verilmiştir.

3.1.1. Baralar

Rabak fiderinin bağlı olduğu test sisteminin kısa devre gücü 418 MVA'dır. Bahsi geçen sistemde toplamda 37 adet bara bulunmaktadır. 25 adet barada gözlem yapılmaktadır ve bunların 12 tanesi yük barasıdır. Bütün yükler için güç faktörü 0,98 (endüktif) olarak kabul edilmiştir. Baralara ait özet bilgiler Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1. Baralara ait özet veriler

Bara Adı	Bara Yüğü (MVA)	Ağırlık Faktörü (w_j)
B2.1.1	0,15	0,020548
B2.2.1.1	0,96	0,131507
B2.2.2.1.1	0,24	0,032877
B1.2	0,96	0,131507
B2.2.2.2.1	0,06	0,008219
B4.2.2.1.1.1	0,96	0,131507
B4.2.2.1.2.1	0,378	0,051781
B4.2.1.1	0,96	0,131507
B6.2	0,24	0,032877
B4.2.2.2.1.1	0,96	0,131507
B4.2.2.2.2.2	0,378	0,051781
B8.1	1	0,136986

Tablo 3.1’de ağırlık faktörü olan (w_j) ilgili bara yükünün toplam yüke bölünmesiyle bulunmaktadır. İlgili düzenekte baralara ait toplam yük değeri 7,3 MVA’dır. Yüklerin tamamı harmonikli olarak seçilmiş olup harmonik değerleri Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.2. Yüklere ait harmonik bilgileri

Harmonik Mertebesi	Yüzde Değerleri
5. harmonik	%20
7. harmonik	%14,28
11. harmonik	%9,09
13. harmonik	%2,7
17. harmonik	%2,48

3.1.2. Trafolar

Sistemde toplamda 14 adet transformatör bulunmaktadır. Bu transformatörlerin her birinin $\%U_k$ değeri 4,5’tir. Transformatörlere ait özet veriler Tablo 3.3’teki gibidir.

Tablo 3.3. Dönüştürme oranı 34,5/0,4 kV olan transformatörlere ait özet veriler

Güç	Primer Sargı Terminali	Sekonder Sargı Terminali
1600 kVA	B4.2.2.2.1	B4.2.2.2.1.1
	B1.1	B1.2
	B2.2.1	B2.2.1.1
	B4.2.1	B4.2.1.1
	B4.2.2.1.1	B4.2.2.1.1.1
	B8	B8.2
1000 kVA	B8	B8.1
630 kVA	B4.2.2.1.2	B4.2.2.1.2.1
	B4.2.2.2.2.1	B4.2.2.2.2.2
400 kVA	B2.2.2.1	B2.2.2.1.1
	B6.1	B6.2
	B8	B8.1
250 kVA	B2.1	B2.1.1
100 kVA	B2.2.2.2	B2.2.2.2.1

3.1.3. Hatlar

Hat verileri Tablo 3.4’te verilmiştir.

Tablo 3.4. Hat verileri

Hattın Adı	İletken Tipi	Giriş Terminali	Çıkış Terminali	Uzunluk (km)	GMR (mm)	DC Direnç (ohm/km)	Anma çapı (mm)	R ₊ (ohm/km)	X ₊ (ohm/km)	R ₀ (ohm/km)	X ₀ (ohm/km)
Hat1	34,5 kV Hawk	B1	B2	4	7,90251	0,1194	21,77	-	-	-	-
Hat1.1	34,5 kV Swallow	B1	B1.1	2,5	2,59182	1,0742	7,14	-	-	-	-
Hat2	34,5 kV Hawk	B2	B3	5	7,90251	0,1194	21,77	-	-	-	-
Hat2.1	34,5 kV Pigeon	B2	B2.1	2,5	4,62	0,3366	12,75	-	-	-	-
Hat2.2	34,5 kV Raven	B2	B2.2	0,4	3,66	0,5362	10,11	-	-	-	-
Hat2.2.1	N2XSYP 1 x 50 20,3/35	B2.2	B2.2.1	8	-	-	-	0,508	0,232	2,032	0,928
Hat2.2.2	34,5 kV Swallow	B2.2	B2.2.2	3	2,59182	1,0742	7,14	-	-	-	-
Hat2.2.2.1	34,5 kV Swallow	B2.2.2	B2.2.2.1	1,25	2,59182	1,0742	7,14	-	-	-	-
Hat2.2.2.2	34,5 kV Swallow	B2.2.2	B2.2.2.2	2,5	2,59182	1,0742	7,14	-	-	-	-
Hat3	N2XSYP 1 x 240	B3	B4	1	-	-	-	0,114	0,186	0,456	0,744
Hat4	N2XSYP 1 x 240	B4	B5	1,5	-	-	-	0,114	0,186	0,456	0,744

Tablo 3.4. (Devam) Hat verileri

Hattın Adı	İletken Tipi	Giriş Terminali	Çıkış Terminali	Uzunluk (km)	GMR (mm)	DC Direnç (ohm/km)	Anma çapı (mm)	R ₊ (ohm/km)	X ₊ (ohm/km)	R ₀ (ohm/km)	X ₀ (ohm/km)
Hat4.1	N2XSY 1 x 95 20,3/35 kV	B4	B4.1	1	-	-	-	0,259	0,213	1,076	0,952
Hat4.2	34,5 kV Pigeon	B4.1	B4.2	2	4,62	0,3366	12,75	-	-	-	-
Hat4.2.1	34,5 kV Swallow	B4.2	B4.2.1	0,5	1,0742	2,59182	7,14	-	-	-	-
Hat4.2.2	34,5 kV Pigeon	B4.2	B4.2.2	2	4,62	0,3366	12,75	-	-	-	-
Hat4.2.2.1	34,5 kV Swallow	B4.2.2	B4.2.2.1	0,4	1,0742	2,59182	7,14	-	-	-	-
Hat4.2.2.1.1	34,5 kV Swallow	B4.2.2.1	B4.2.2.1.1	2,5	1,0742	2,59182	7,14	-	-	-	-
Hat4.2.2.1.2	N2XSY 1 x 95 20,3/34,5 kV	B4.2.2.1	B4.2.2.1.2	0,5	-	-	-	0,259	0,213	1,076	-
Hat4.2.2.2	34,5 kV Pigeon	B4.2.2	B4.2.2.2	2,5	4,62	0,3366	12,75	-	-	-	-
Hat4.2.2.2.1	34,5 kV Swallow	B4.2.2.2	B4.2.2.2.1	0,2	1,0742	0,59182	7,14	-	-	-	-
Hat4.2.2.2.2	34,5 kV Pigeon	B4.2.2.2.	B4.2.2.2.2	1,5	4,62	0,3366	12,75	-	-	-	-
Hat4.2.2.2.2.1	N2XSY 1 x 95 20,3/34,5 kV	B4.2.2.2.2	B4.2.2.2.2.1	0,5	-	-	-	0,259	0,213	1,076	-

Tablo 3.4. (Devam) Hat verileri

Hattın Adı	İletken Tipi	Giriş Terminali	Çıkış Terminali	Uzunluk (km)	GMR (mm)	DC Direnç (ohm/km)	Anma çapı (mm)	R ₊ (ohm/km)	X ₊ (ohm/km)	R ₀ (ohm/km)	X ₀ (ohm/km)
Hat5	34,5 Hawk	B5	B6	3	7,90251	0,1194	21,77	-	-	-	-
Hat5.1	N2XSY 1 x 50 20,3/34,5 kV	B6	B6.1	0,4	-	-	-	0,508	0,232	2,032	0,928
Hat6	34,5 Hawk	B6	B7	0,3	7,90251	0,1194	21,77	-	-	-	-
Hat7	N2XSY 1 x 70 20,3/34,5 kV	B7	B8	0,5	-	-	-	0,355	0,221	1,42	0,844
TM Çıkış Havai	34,5 Hawk	Tr Merkezi	B1	4,5	7,90251	0,1194	21,77	-	-	-	-
TM Çıkış Kablo	N2XSY 1 x 240 20,3/34,5 kV	Trafo Merkezi	Tr Merkezi	0,2	-	-	-	0,114	0,186	0,456	0,744

3.1.4. Dağıtılmış Üretim Kaynakları

Tez çalışması kapsamında DÜK olarak iki farklı kaynak tipi seçilmiştir. Bunlardan ilki senkron generatör içeren geleneksel santral diğeri ise rüzgar çiftliği santralidir.

Senkron generatörler yüksek miktarda güç üretimi sağlayan birkaç kVA değerinden yüzlerce MVA değerine kadar farklı güç seviyelerinde tasarlanan makinelerdir (Varan ve diğ., 2017). Bu makineler gerilim profilini iyileştirme ve harmonikleri kompanze edebilme özelliklerinden ötürü her biri 1,9 MVA gücünde olmak üzere toplamda üç adet senkron generatör geleneksel santrallere entegre edilmiştir.

Yenilenebilir bir enerji kaynağı olan rüzgar çiftliği harmonikleri kompanze etmek ve gerilim profilini iyileştirmek için modellenmiştir. Sisteme toplamda her biri 1,9 MVA gücünde üç adet rüzgar çiftliği entegre edilmiştir.

Her bir santralin nominal gerilim değeri 6,3 kV, güç faktörü ise 0,98 endüktiftir. Senkron generatörler ve rüzgar çiftlikleri test sistemine dönüştürme oranı 34,5/6,3kV, nominal gücü 1,9 MVA, %U_k değeri 4,5, bakır kayıpları 2,55 kW olan bir trafo üzerinden bağlanmıştır. Kullanılan dağıtık üretim kaynakları ile ilgili bilgiler Ek-A'da belirtilmiştir.

3.2. Analizi Yapılan Durumlar

Verilen bu sistemde güç kalitesi için aşağıdaki durumların analizi yapılmıştır.

1. Analiz: Tüm yüklerin Tablo 3.2'de verilen harmonik değerlerine sahip olması halinde farklı güç seviyelerindeki senkron generatörlerin/rüzgar çiftliklerinin şebekeye en yakın baraya (B2) bağlı olduğu durum için:

1.1. THD değişim indislerinin,

1.2. Gerilim değişim indislerinin hesaplanması ve güç seviyeleri düzeyinde hesaplanan indislerin kıyaslanması

2. Analiz: Tüm yüklerin harmonikli olması halinde farklı güç seviyelerindeki senkron generatörlerin/rüzgar çiftliklerinin şebekeye en uzak baraya (B4.2.2.2) bağlı olduğu durum için:

2.1. THD değişim indislerinin,

2.2. Gerilim değişim indislerinin hesaplanması ve güç seviyeleri düzeyinde hesaplanan indislerin kıyaslanması

3. Analiz: Sadece bir baranın (B1.2) yükünün Tablo 3.2'deki gibi harmonikli olması halinde üç adet senkron generatörün en uzak baraya bağlı olduğu durum için:

3.1. THD değişim indislerinin kıyaslanması,

3.2. Analiz 3 sonuçlarının tüm baralarda harmonikli yükün tanımlı olması ile elde edilen THD değişim indisleri ile kıyaslanması

4. Analiz: Tüm yüklerin harmonikli olması halinde B4 barasına üç adet senkron generatör/rüzgar çiftliğinin bağlı olduğu durumlar için gerilim değişim indislerinin kıyaslanması,

5. Analiz: Tüm sistemde Tablo 3.5'te verilen yeni harmonik değerlerinde yüklerin var olduğu durumda üç adet senkron generatörün en uzak baraya bağlı olduğu durum ile üç adet rüzgar çiftliğinin en uzak baraya bağlı olduğu durumun THD değişim indisleri açısından kıyaslanması,

Tablo 3.5. Yüklere ait yeni harmonik değerleri (Yazdani-Asrami ve diğ., 2021)

Harmonik Mertebesi	Genlik (%)	Faz Açısı (°)
5.	25	-94
7.	17	-67
11.	9	-67
13.	5	-46

6. Analiz: B4.2.2.2.1.1 ve B4.2.2.2.2.1 baralarında Tablo 3.5'te verilen harmonik mertebelerine ait genlik ve faz açıları dikkate alınarak yüklerin tanımlı olduğu durumda en uzak (B4.2.2.2) baraya üç adet senkron generatörün bağlı olduğu durum ile üç adet rüzgar çiftliğinin bağlı olduğu durumun THD indisleri açısından kıyaslanması gerçekleştirilmiştir.

3.3. Benzetim Sonuçları

Test sisteminde en uzak baraya (B4.2.2.2) üç adet senkron generatör, üç adet de rüzgar çiftliği eklenmiştir. Senkron generatör yokken, 1,9 MVA gücünde bir, iki ve üç adet senkron generatör bağlı iken; rüzgar çiftliği yokken, 1,9 MVA gücünde bir, iki ve üç adet rüzgar çiftliği bağlı iken ayrı ayrı güç akışı analizi gerçekleştirilmiştir. Söz konusu tüm yükler harmonikli olarak seçilmiştir. DÜK'ün olduğu ve olmadığı durumlarda elde edilen güç akışı analiz sonuçları en uzak bara için hem THD hem de gerilim

değişimi açısından hem senkron generatör hem de rüzgar çiftliği üzerinden Tablo 3.6 ve 3.7’de sırası ile verilmiştir. Ayrıca kısa devre durumundaki davranışlarının matematiksel olarak analiz edilmesi oldukça önemlidir. Bu nedenle tez çalışması kapsamında kısa devre analizi de gerçekleştirilmiştir. Analiz rastgele seçilen B2, B4 ve B8 baraları üzerinde yapılmıştır. Senkron generatörler devredeyken en yakın ve en uzak bara için analizler gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizlerin yanısıra sistemin elde edilen kısa devre akımı değerleri sırasıyla Tablo 3.8 ve Tablo 3.9’da verilmiştir.

Tablo 3.6. Baralara ait % THD değerleri

Bara İsmi	Senkron Generatör				Rüzgar Çiftliği		
	Dük Yok	1,9 MVA	3,8 MVA	5,7 MVA	1,9 MVA	3,8 MVA	5,7 MVA
Trafo Merkezi	3,81	3,62	3,44	3,29	3,80	3,78	3,76
Barası							
B1.1	5,59	5,31	5,05	4,82	5,56	5,53	5,49
B1.2	10,64	10,36	10,09	9,85	10,62	10,58	10,53
B2	6,67	6,31	5,98	5,69	6,63	6,58	6,53
B2.1	6,69	6,33	6	5,71	6,65	6,60	6,55
B2.1.1	11,74	11,36	11,01	10,69	11,69	11,62	11,55
B4	8,01	7,54	7,11	6,73	7,95	7,88	7,81
B4.2.2.1.1	9,07	8,47	7,94	7,47	8,97	8,86	8,75
B4.2.2.1.1.1	14,32	13,64	13,03	12,49	14,14	13,96	13,78
B4.2.2.1.2	8,91	8,32	7,79	7,32	8,81	8,71	8,60
B4.2.2.1.2.1	14,15	13,42	12,87	12,33	13,97	13,79	13,61
B4.2.1	8,60	8,05	7,57	7,13	8,51	8,42	8,33
B4.2.1.1	13,80	13,19	12,64	12,15	13,65	13,50	13,36
B4.2.2.2	9,06	8,40	7,83	7,31	8,94	8,82	8,70
B4.2.2.2.1	9,07	8,42	7,84	7,32	8,95	8,83	8,71
B4.2.2.2.1.1	14,30	13,55	12,88	12,28	14,09	13,87	13,65
B4.2.2.2.2.1	9,10	8,44	7,86	7,35	8,98	8,86	8,73
B4.2.2.2.2.2	14,34	13,59	12,92	12,32	14,13	13,91	13,69
B6.1	8,25	7,77	7,35	6,96	8,19	8,12	8,05
B6.2	13,43	12,90	12,43	12	13,32	13,22	13,11
B2.2.1	6,73	6,37	6,04	5,75	6,69	6,64	6,59
B2.2.1.1	11,83	11,44	11,09	10,78	11,77	11,71	11,63
B2.2.2.1	6,79	6,42	6,10	5,80	6,75	6,70	6,65
B2.2.2.1.1	11,90	11,51	11,16	10,84	11,84	11,77	11,70
B2.2.2.2	6,78	6,42	6,09	5,79	6,74	6,69	6,64
B2.2.2.2.1	11,23	10,84	10,49	10,17	11,17	11,11	11,03
B8.1	14,47	13,93	13,45	13,02	14,35	14,24	14,12
B8.2	8,28	7,80	7,37	6,99	8,22	8,15	8,07
B8	8,28	7,80	7,37	6,99	8,22	8,15	8,07

Tablo 3.7. Gerilim değerlerini içeren güç akışı analizi sonuçları

Bara İsmi	Senkron Generatör				Rüzgar Çiftliği		
	Dük Yok	1,9 MVA	3,8 MVA	5,7 MVA	1,9 MVA	3,8 MVA	5,7 MVA
B1.1	0,992	0,994	0,995	0,996	0,994	0,995	0,996
B1.2	0,986	0,987	0,988	0,989	0,987	0,988	0,989
B2	0,991	0,993	0,996	0,998	0,993	0,995	0,997
B2.1	0,991	0,993	0,995	0,998	0,993	0,995	0,997
B2.1.1	0,979	0,981	0,984	0,986	0,981	0,983	0,985
B4	0,987	0,99	0,994	0,998	0,99	0,994	0,997
B4.2.2.1.1	0,978	0,985	0,992	0,999	0,985	0,992	0,998
B4.2.2.1.1.1	0,972	0,978	0,985	0,992	0,979	0,985	0,992
B4.2.2.1.2	0,981	0,988	0,994	1,001	0,988	0,994	1,001
B4.2.2.1.2.1	0,972	0,979	0,986	0,993	0,979	0,986	0,993

Tablo 3.7. (Devam) Gerilim değerlerini içeren güç akışı analizi sonuçları

Bara İsmi	Senkron Generatör				Rüzgar Çiftliği		
	Dük Yok	1,9 MVA	3,8 MVA	5,7 MVA	1,9 MVA	3,8 MVA	5,7 MVA
B4.2.1	0,983	0,988	0,994	0,999	0,988	0,993	0,998
B4.2.1.1	0,976	0,981	0,987	0,992	0,981	0,987	0,992
B4.2.2	0,980	0,989	0,997	1,005	0,989	0,997	1,005
B4.2.2.1	0,980	0,988	0,997	1,005	0,989	0,997	1,005
B4.2.2.2.1	0,973	0,982	0,99	0,998	0,982	0,99	0,998
B4.2.2.2.1	0,992	0,988	0,996	1,004	0,989	0,997	1,005
B4.2.2.2.2	0,986	0,98	0,988	0,996	0,98	0,989	0,997
B6.1	0,991	0,99	0,993	0,997	0,989	0,993	0,996
B6.2	0,991	0,98	0,984	0,988	0,98	0,983	0,986
B2.2.1	0,979	0,993	0,995	0,997	0,992	0,995	0,996
B2.2.1.1	0,987	0,986	0,988	0,99	0,986	0,988	0,99
B2.2.2.1	0,978	0,992	0,994	0,996	0,992	0,994	0,996
B2.2.2.1.1	0,972	0,982	0,985	0,987	0,982	0,984	0,986
B2.2.2.2	0,981	0,992	0,994	0,997	0,992	0,994	0,996
B2.2.2.2.1	0,972	0,972	0,974	0,976	0,972	0,974	0,976
B8.1	0,983	0,98	0,984	0,987	0,979	0,983	0,986
B8.2	0,976	0,989	0,993	0,997	0,989	0,992	0,996
B8	0,980	0,989	0,993	0,997	0,989	0,992	0,996

Güç akışı açısından elde edilen sonuçlar incelendiğinde artan DÜK gücüne bağlı olarak her iki dağıtılmış üretim kaynağı için %THD değerlerinde azalma meydana gelirken gerilim değerlerinde ise bir artış gözlemlenmiştir. Bu iki durum DÜK'lerin varlığının güç kalitesi üzerinde olumlu etkilerinin olduğunu göstermektedir. Ayrıca bu analizlerde hem senkron generatör hem de rüzgar çiftliği baraların gerilimini kontrol eden modda çalışmaktadır. Bu nedenle hem senkron generatörün hem de rüzgar çiftliğinin var olduğu durumlarda bara gerilimleri aynıdır.

Tablo 3.8. En yakın bara için kısa devre analizi sonuçları

	B2	B4	B8
Dük Yok	3,8 kA	2,9 kA	2,4 kA
1,9 MVA	3,9 kA	3 kA	2,5 kA
3,8 MVA	4 kA	3,1 kA	2,5 kA
5,7 MVA	4 kA	3,1 kA	2,6 kA

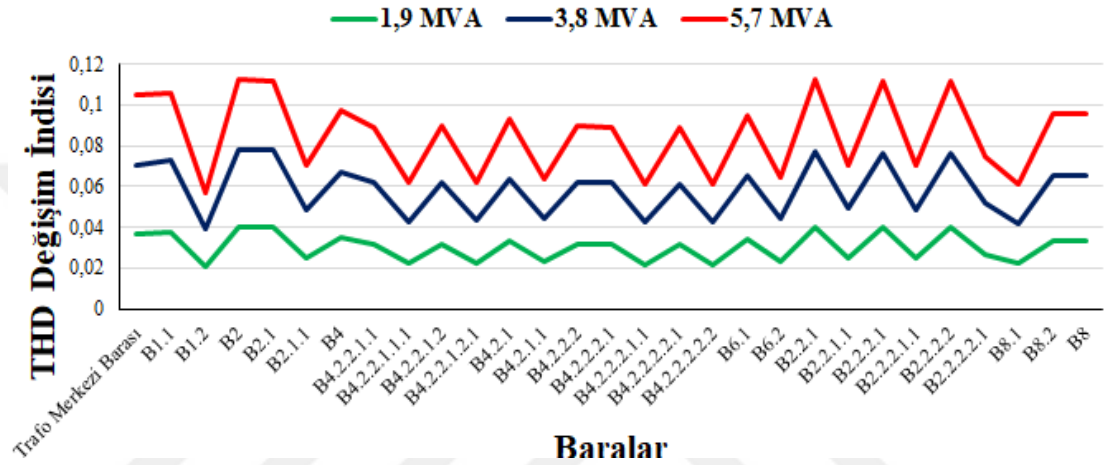
Tablo 3.9. En uzak bara için kısa devre analizi sonuçları

	B2	B4	B8
Dük Yok	3,8 kA	2,9 kA	2,4 kA
1,9 MVA	3,9 kA	3 kA	2,5 kA
3,8 MVA	4,1 kA	3,2 kA	2,6 kA
5,7 MVA	4,2 kA	3,3 kA	2,7 kA

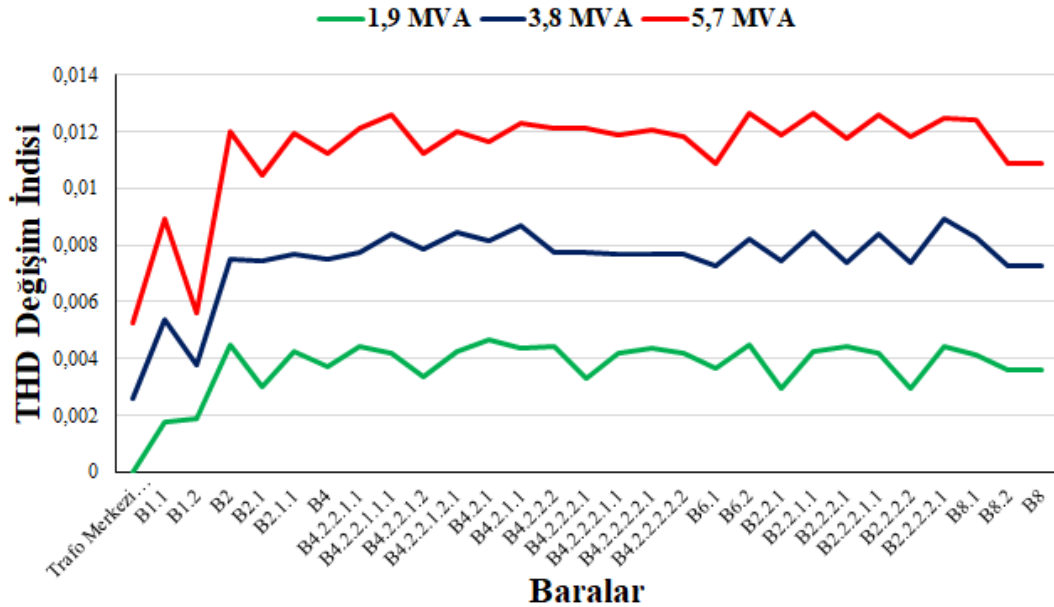
Kısa devre analizi açısından yapılan incelemelerde de artan DÜK gücünün kısa devre akımlarına olan katkısı gözlemlenmiştir.

Örnek test sisteminde gerilim profilini ve harmonikleri iyileştirmek amacıyla senkron generatörler ve rüzgar çiftlikleri modellenmiştir. En yakın (B2) ve en uzak (B4.2.2.2) baralar ile rastgele seçilen B4 üzerinden benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

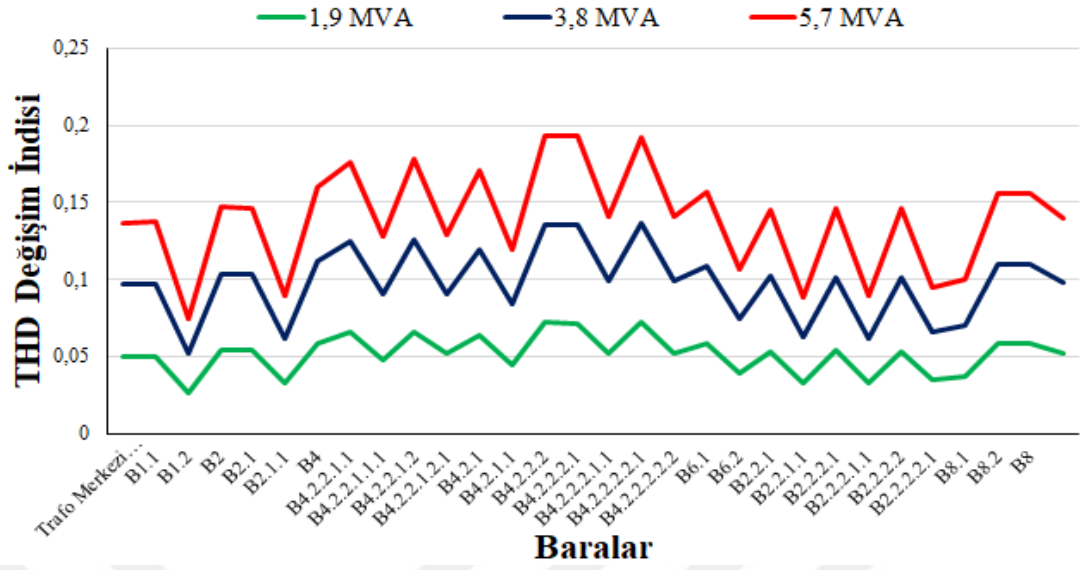
En yakın (B2) ve en uzak bara (4.2.2.2) için THD değişim indislerine ait grafikler hem senkron generatör hem de rüzgar çiftliği için Şekil 3.2, Şekil 3.3, Şekil 3.4 ve Şekil 3.5'te sırasıyla verilmiştir. Değişim indisi değerleri 100 ile çarpılmadan hesaplanmıştır.



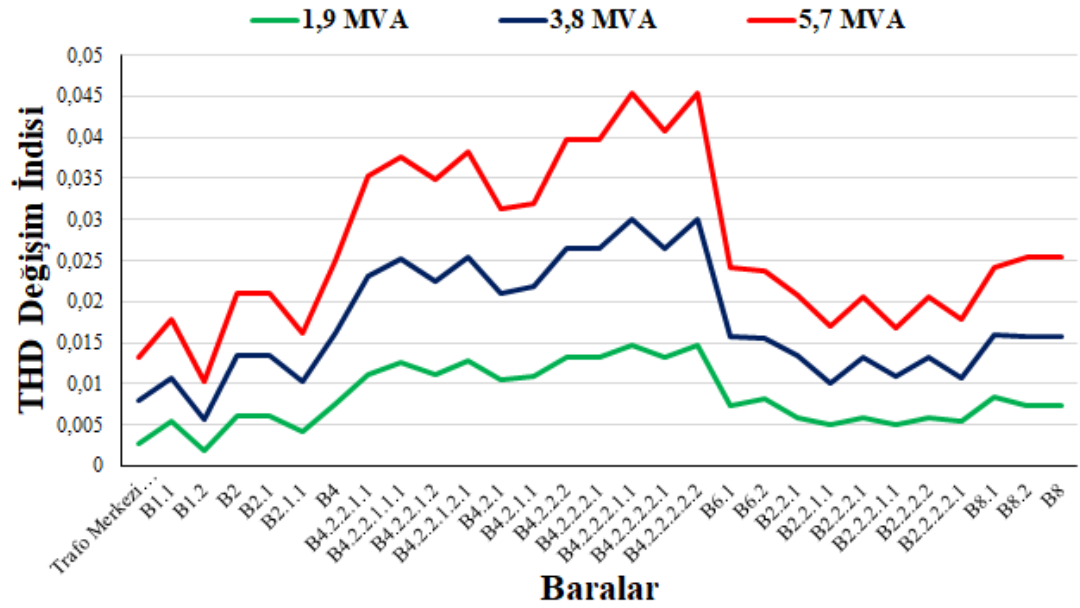
Şekil 3.2. En yakın bara (B2) için senkron generatörün bağlı olduğu durumda THD değişim indisleri



Şekil 3.3. En yakın bara (B2) için rüzgar çiftliğinin bağlı olduğu durumda THD değişim indisleri



Şekil 3.4. En uzak bara (B4.2.2.2) için senkron generatörün bağlı olduğu durumda



Şekil 3.5. En uzak bara (B4.2.2.2) için rüzgar çiftliğinin bağlı olduğu durumda THD değişim indisleri

Analizler sonucunda senkron generatörlerin ve rüzgar çiftliklerinin sisteme entegrasyonu ile birlikte THD değerlerinde bir azalma görülmüştür. THD değerlerinde yaşanan bu azalma sistemde THD açısından bir iyileşme yaşandığına işaret eder. Bunun neticesinde de görüldüğü üzere THD değişim indisleri pozitif değerler alır, bu istenen bir durumdur. Ayrıca eklenen her senkron generatör ve rüzgar çiftliği yaşanan iyileşmenin miktarını arttırmıştır. En yakın ve en uzak baralardaki THD değişimi karşılaştırıldığında senkron generatörün ve rüzgar çiftliğinin entegrasyonu ile

şebekeden uzaklaştıkça harmonikler için göstergeler olan indislerde daha çok iyileşmenin yaşandığı gözlemlenmiştir. Senkron generatör ve rüzgar çiftliği açısından gözlemlenen iyileşmeler karşılaştırıldığında senkron generatörün daha fazla iyileşme sağladığı görülmüştür. Her ünite başına iyileşmelerin ortalama değerleri en yakın ve en uzak bara için Tablo 3.10 ve Tablo 3.11’de sırasıyla verilmiştir. Tablolar incelendiğinde senkron generatörün rüzgar çiftliğine kıyasla THD açısından daha etkili olduğu sonucuna varılmıştır.

Tablo 3.10. En yakın bara (B2) için THD değişim indislerinin ortalama değerlerinin senkron generatörler ve rüzgar çiftlikleri üzerinden karşılaştırılması

	Senkron Generatör	Rüzgar Çiftliği
1,9 MVA	0,030471	0,00371
3,8 MVA	0,058815	0,007442
5,7 MVA	0,085362	0,011324

Tablo 3.11. En uzak bara (B4.2.2.2) için THD değişim indislerinin ortalama değerlerinin senkron generatörler ve rüzgar çiftlikleri üzerinden karşılaştırılması

	Senkron Generatör	Rüzgar Çiftliği
1,9 MVA	0,051688	0,008376
3,8 MVA	0,097846	0,017456
5,7 MVA	0,139232	0,026934

Sistemin genel durumunu bilmek dağıtım sistemi ile ilgili bilgi sahibi olmak açısından önemlidir (Ekinci ve Basa Arsoy, 2020). Bu nedenle mevcut sistemin en yakın ve en uzak baraları için sistem indisleri hesaplanmıştır. Elde edilen değerler Tablo 3.12 ve Tablo 3.13’te verilmiştir.

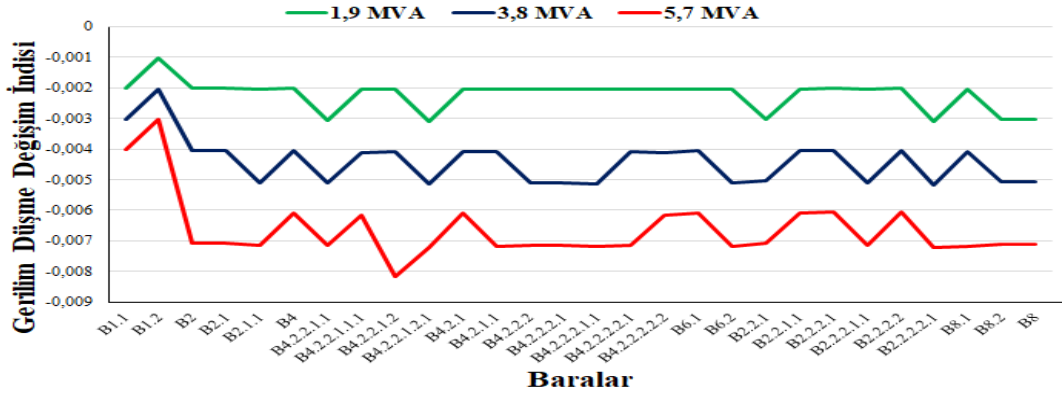
Tablo 3.12. En yakın bara (B2) için THD sistem indisleri değerleri

Güç	Senkron Generatör	Rüzgar Çiftliği
1,9 MVA	0,133861	0,136372
3,8 MVA	0,13994	0,13585
5,7 MVA	0,128344	0,135312

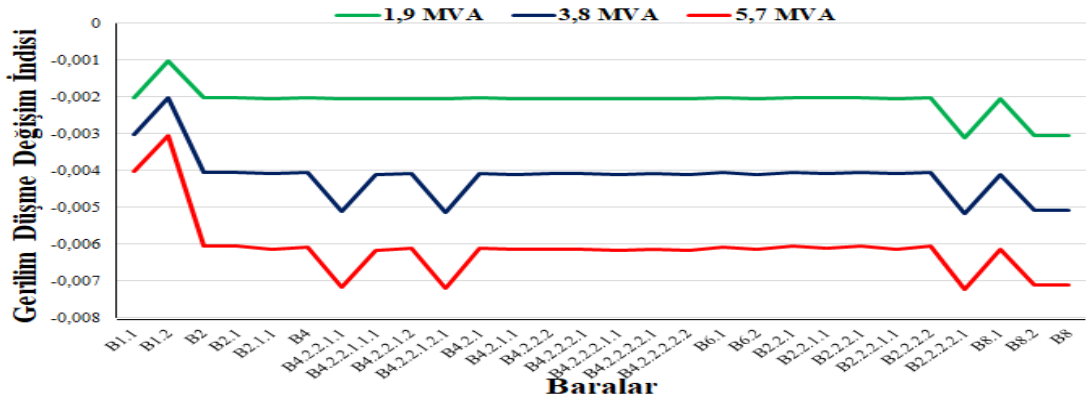
Tablo 3.13. En uzak bara (B4.2.2.2) için THD sistem indisleri değerleri

Güç	Senkron Generatör	Rüzgar Çiftliği
1,9 MVA	0,130658	0,135411
3,8 MVA	0,125273	0,133858
5,7 MVA	0,120333	0,132272

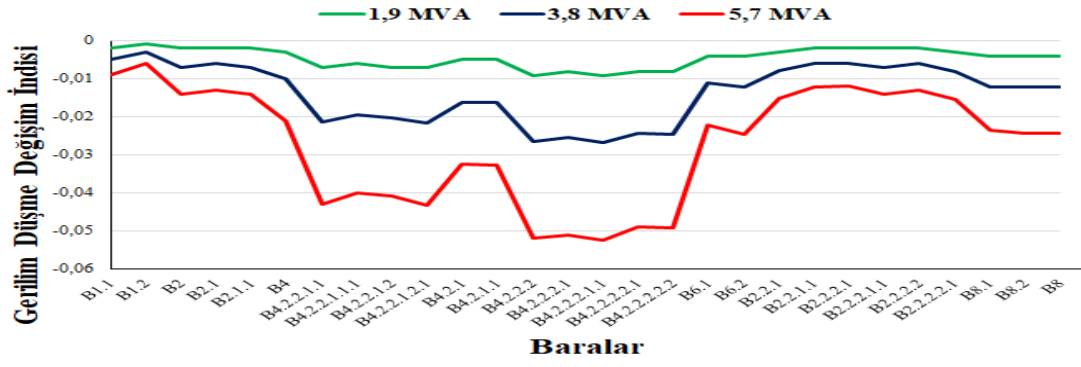
Tablo 3.12 ve Tablo 3.13 incelendiğinde güç arttıkça THD için sistem indislerinin değerlerinin azaldığı görülmüştür. Elde edilen sonuçlara dayanarak artan güç ile birlikte güç kalitesinde bir iyileşmenin yaşandığı tespit edilmiştir. Yine en yakın ve en uzak bara açısından kıyas yaptığımızda şebekeden uzaklaştıkça sistem indisleri açısından bir iyileşmenin yaşandığından söz edilebilir. Ayrıca senkron generatör ile rüzgar çiftliği kıyaslandığında sistem indislerinden de anlaşılacağı gibi sistem indislerinde meydana gelen azalma senkron generatörde rüzgar çiftliğine oranla daha fazladır. Elde edilen bu sonuçlar literatürde yer alan çalışmalar ile kıyaslanmıştır ve görülmüştür ki bizim çalışmamızda olduğu gibi diğer çalışmalarda da rüzgar çiftlikleri güç kalitesi indisleri üzerinde kayda değer bir iyileştirme sağlamamaktadır (Cziker ve diğ., 2010). En yakın ve en uzak bara için senkron generatör ve rüzgar çiftliğinin kullanılmasına bağlı olarak gerilimde yaşanan değişimlere ait grafikler Şekil 3.6, Şekil 3.7, Şekil 3.8 ve Şekil 3.9’da verilmiştir.



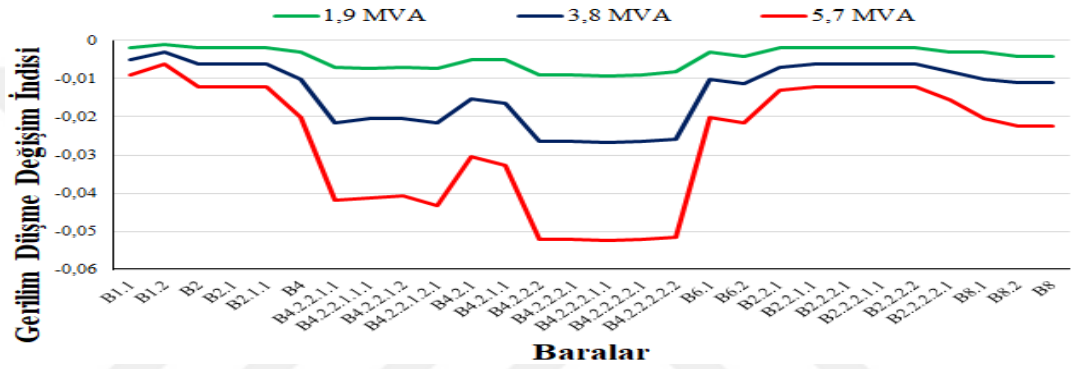
Şekil 3.6. En yakın bara (B2) için senkron generatörün bağlı olduğu durumda gerilim değişim indisleri



Şekil 3.7. En yakın bara (B2) için rüzgar çiftliğinin bağlı olduğu durumda gerilim değişim indisleri



Şekil 3.8. En uzak bara (B4.2.2.2) için senkron generatörün bağlı olduğu durumda gerilim değişim indisleri



Şekil 3.9. En uzak bara (B4.2.2.2) için rüzgar çiftliğinin bağlı olduğu durumda gerilim değişim indisleri

Gerilim açısından incelendiğinde DÜK sisteme entegrasyonu ile birlikte gerilim değerlerinde bir artma meydana gelmiştir. Gerilim değerlerindeki artmanın sonucunda gerilim değişim indisleri negatif değerler alır ve bu da istenilen bir durumdur. Sistemin güç kalitesi açısından iyileştiğini gösterir. Senkron generatör ve rüzgar çiftliğinin açısından gözlemlenen iyileşmeler karşılaştırıldığında senkron generatörün daha fazla iyileşme sağladığı görülmüştür. Her ünite başına iyileşmelerin ortalama değerleri en yakın ve en uzak bara için Tablo 3.14 ve Tablo 3.15'te sırasıyla verilmiştir. En uzak barada yaşanan iyileşmeye bağlı olarak gerilim değişim indisleri daha düşük değerler almaktadır.

Tablo 3.14. En yakın bara (B2) için gerilim değişim indislerinin ortalama değerlerinin senkron generatörler ve rüzgar çiftlikleri üzerinden karşılaştırılması

Güç	Senkron Generatör	Rüzgar Çiftliği
1,9 MVA	-0,00222	-0,00211
3,8 MVA	-0,0044	-0,00415
5,7 MVA	-0,00662	-0,00611

Tablo 3.15. En uzak bara (B4.2.2.2) için gerilim değişim indislerinin ortalama değerlerinin senkron generatörler ve rüzgar çiftlikleri üzerinden karşılaştırılması

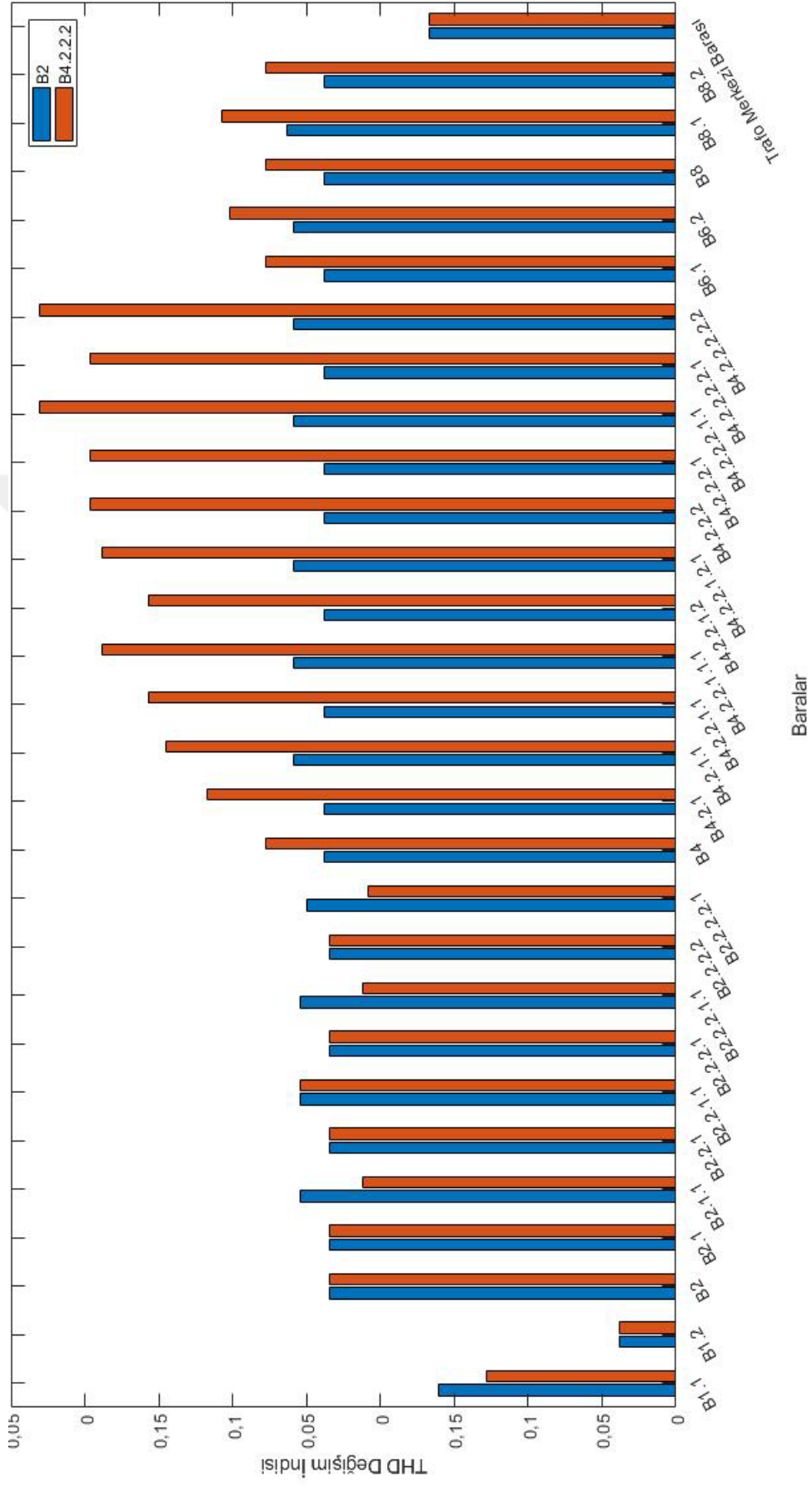
Güç	Senkron Generatör	Rüzgar Çiftliği
1,9 MVA	-0,00456	-0,00456
3,8 MVA	-0,00915	-0,00894
5,7 MVA	-0,01364	-0,01317

B1.2 isimli baradaki yükün harmonikli tanımlandığı durum için en yakın ve en uzak baraya üç adet senkron generatörün bağlanmıştır ve THD değişim indisleri hesaplanmıştır. DÜK'ün en yakın ve en uzak baralara bağlı olduğu durumlar için hesaplanan THD değişim indislerinin kıyaslandığı grafik Şekil 3.10'da verilmiştir.

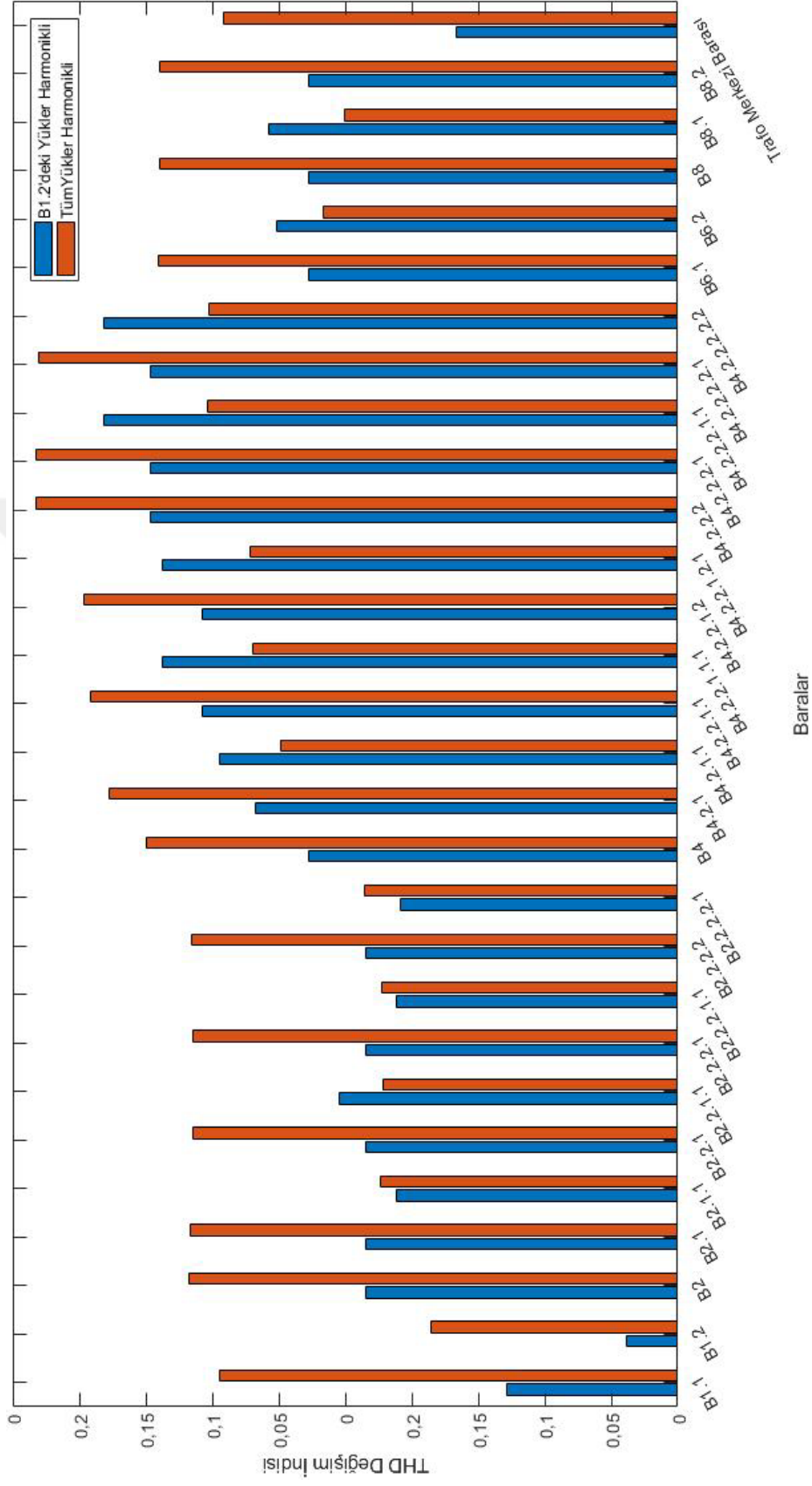
Yapılan benzetim çalışmasında en yakın bara için THD değişim indisinin ortalama değeri 0,093 iken en uzak baradaki THD değişim indisinin ortalama değeri 0,115 olarak hesaplanmıştır. Sadece B1.2 isimli barada harmonikli yükün tanımlı olması durumunda da harmonik açısından en fazla iyileşmenin en uzak barada meydana geldiği görülmüştür.

En uzak bara için üç adet senkron generatörün bağlı olduğu durumda B1.2 isimli barada harmonikli yükün tanımlı olduğu durum ile tüm yüklerin harmonikli olduğu durumlardaki THD değişim indisleri karşılaştırılmıştır. Yapılan analizlerde B1.2 barasında harmonikli yük mevcut iken ortalama değişim 0,11471 iken tüm yüklerin harmonikli olduğu durumda ortalama değişim 0,139232'dir. Yapılan karşılaştırma Şekil 3.11'de verilmiştir.

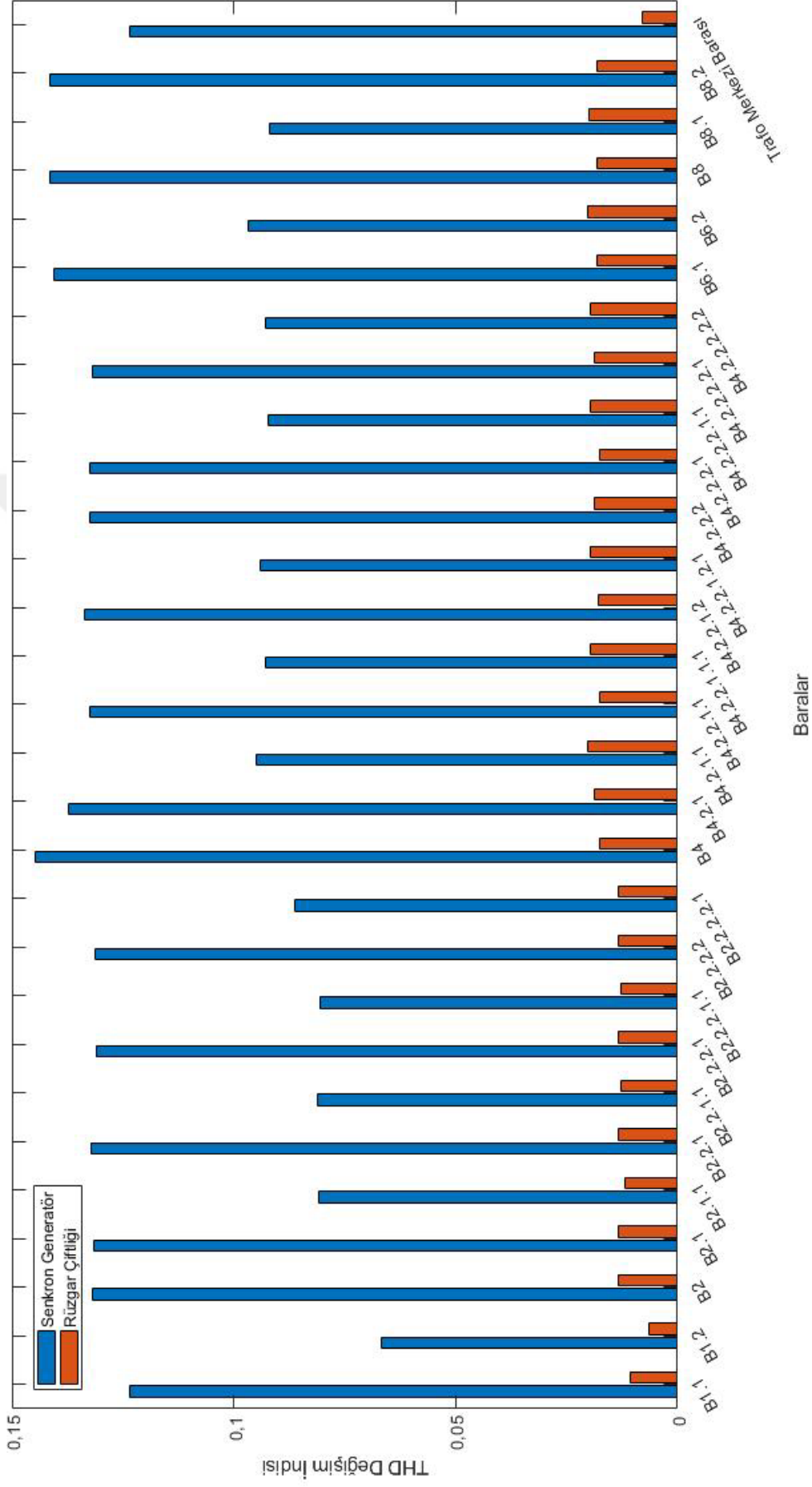
Tüm sistemde harmonikli yüklerin mevcut olduğu durumda rastgele seçilen B4 barasına 5,7 MVA'lık senkron generatör ve rüzgar çiftliğinin ayrı ayrı entegre edilmesi durumlarında THD değişim indislerinin ve gerilim düşme indislerinin değerleri hesaplanarak karşılaştırılmıştır. Şekil 3.12 ve Şekil 3.13'te sırasıyla THD değişim indisleri ve gerilim düşme indisleri senkron generatör ve rüzgar çiftliği için karşılaştırılarak verilmiştir. Yapılan karşılaştırmalar sonucunda görülmüştür ki senkron generatörlerin entegrasyonu sonucunda hem THD değişim indisleri açısından hem de gerilim düşme değişim indisleri açısından rüzgar çiftliğine kıyasla daha fazla iyileşme sağlanmıştır.



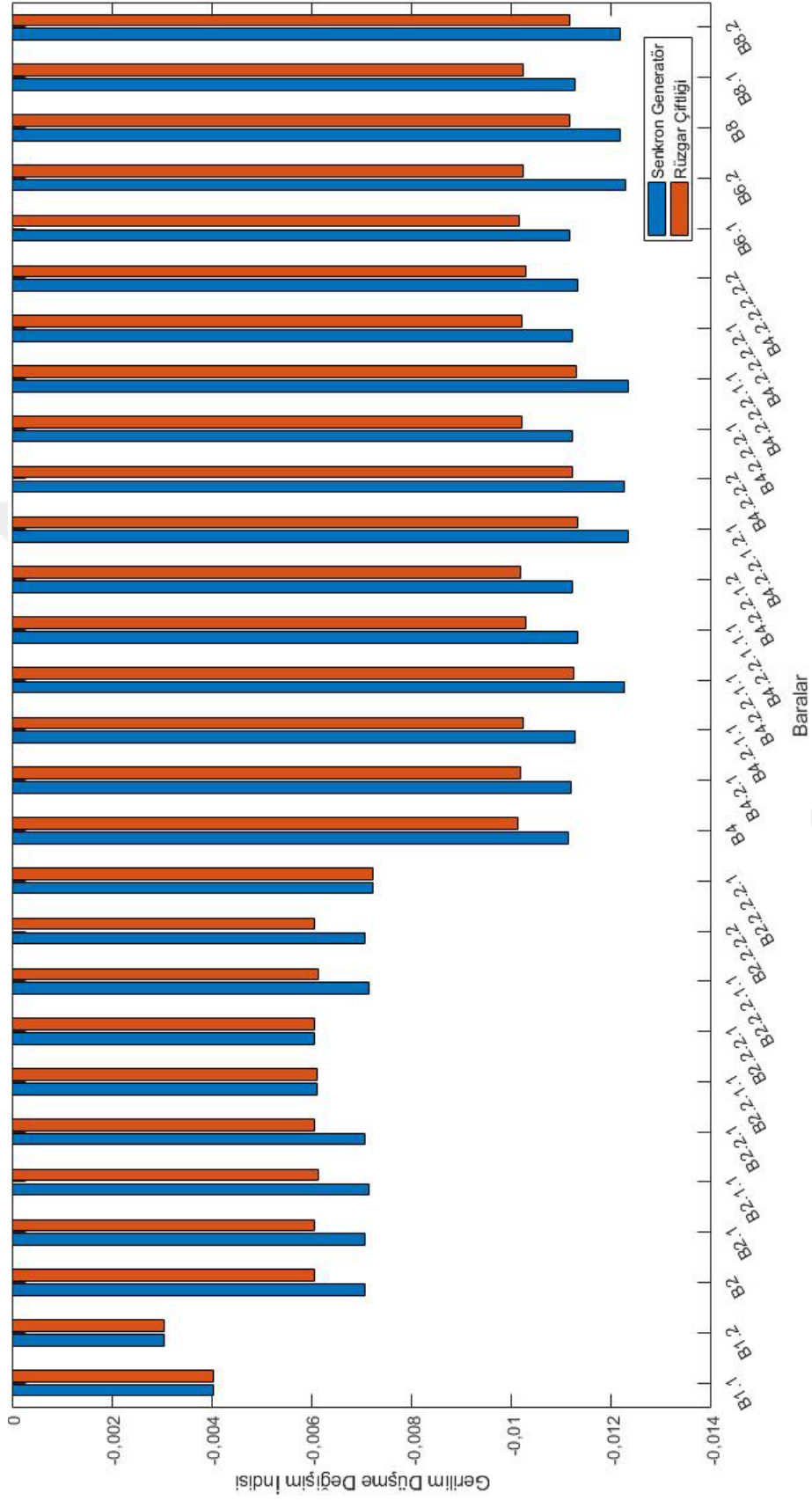
Şekil 3.10. B1.2 isimli barada harmonikli yük tanımlı olduğu durumda en yakın ve en uzak baralara ayrı ayrı 3 adet DÜK bağlı iken THD değişim indisleri



Şekil 3.1.1. Tüm yüklerin harmonikli olduğu durum ile B1.2 isimli barada harmonikli yükün var olması durumunda THD değişim indekslerinin kıyaslanması



Şekil 3.12. B4 barasında senkron generatör ve rüzgar çiftliğinin bağlı olduğu durumlar için THD değişim indislerinin kıyaslanması



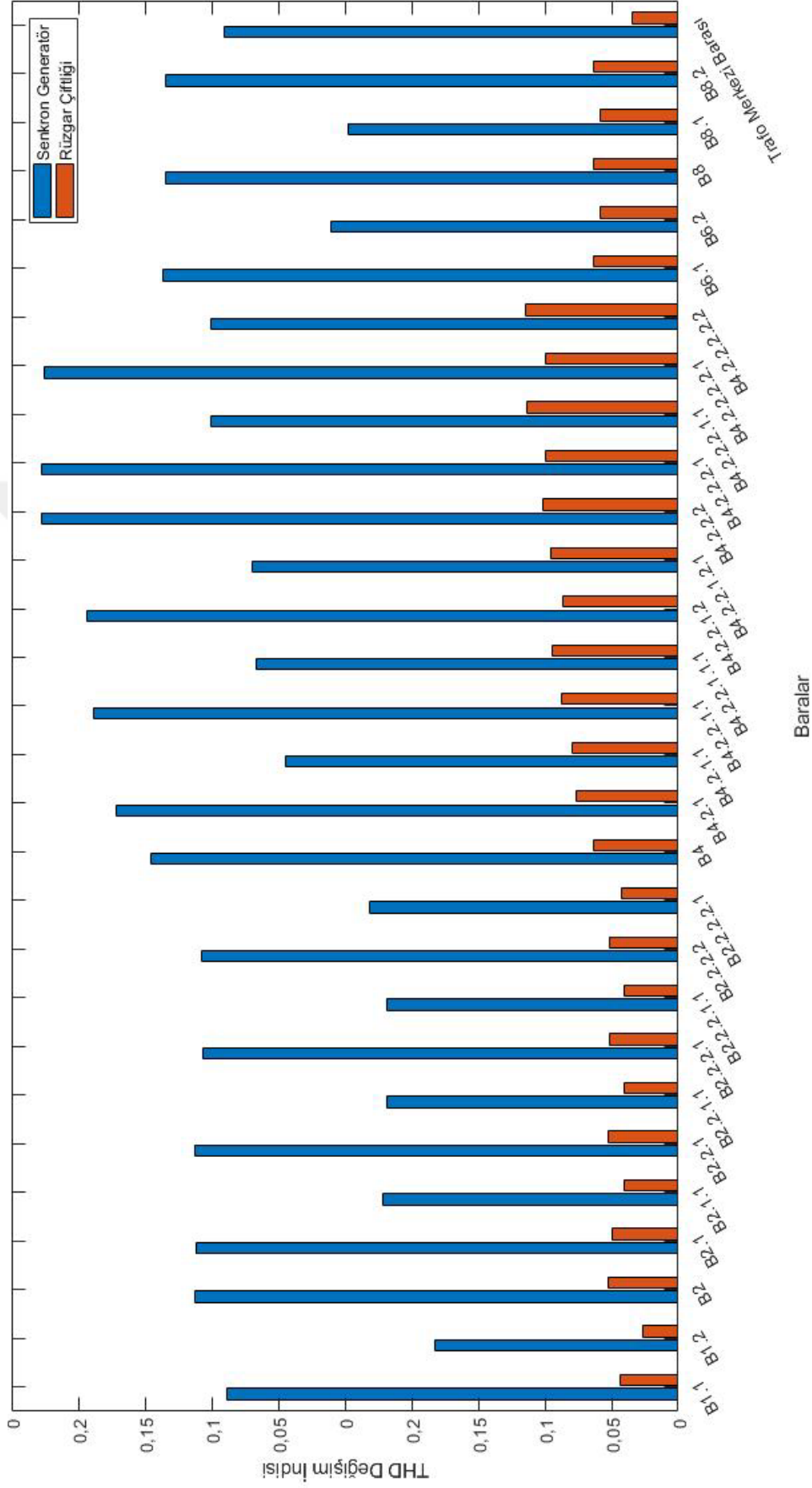
Şekil 3.13. B4 barasında senkron generatör ve rüzgar çiftliğinin bağlı olduğu durumlar için gerilim düşme değişim indislerinin kıyaslanması

Farklı harmonik değerler ile gerçekleştirilen analizler Şekil 3.14'te verilmiştir. Analizler neticesinde görülmüştür ki senkron generatörün sisteme bağlı olduğu durumda rüzgar çiftliğinin bağlı olduğu duruma göre daha fazla iyileşme yaşanmıştır.

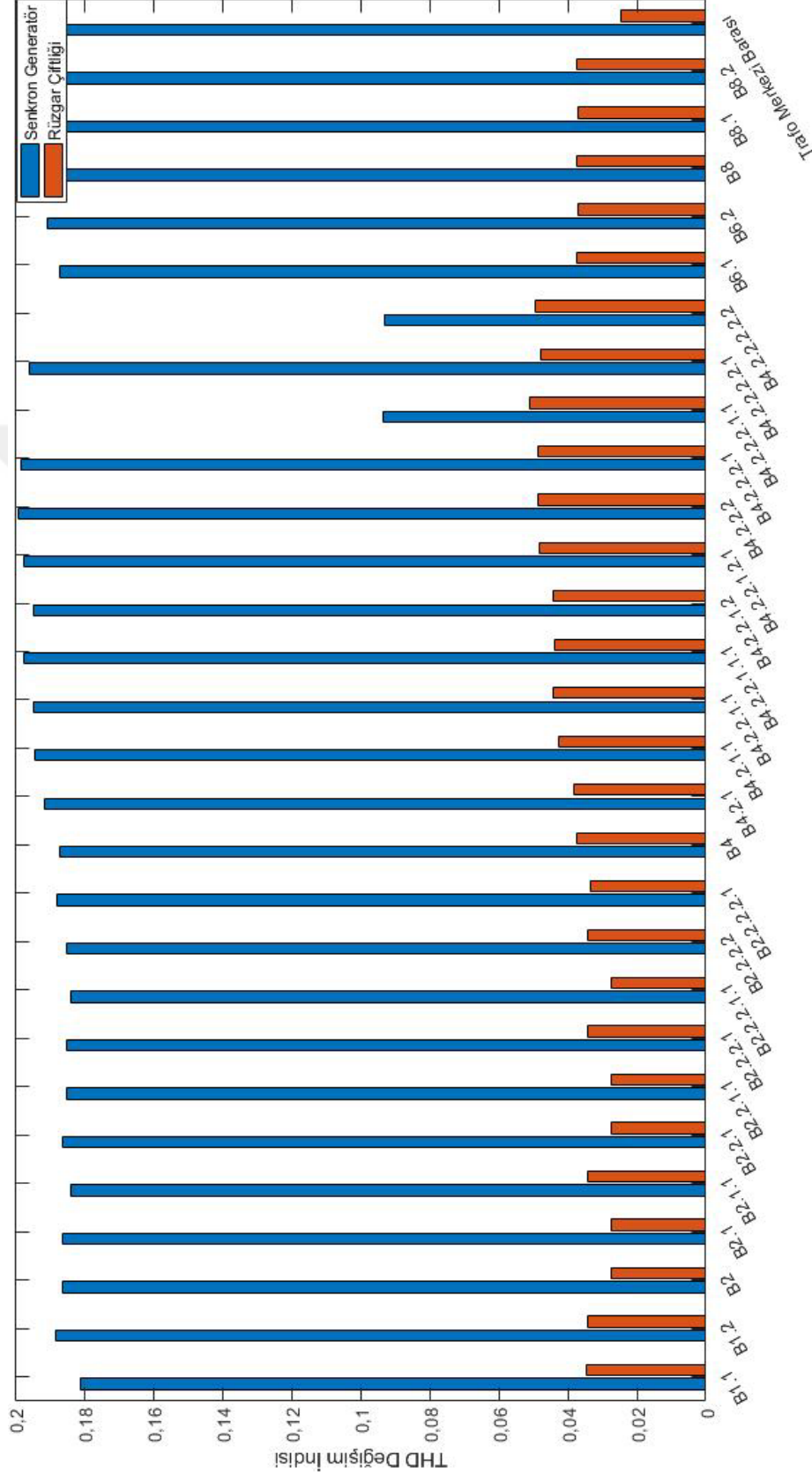
B4.2.2.2.1.1 ve B4.2.2.2.2.1 baralarına Tablo 3.5'te verilen harmonik değerlerine sahip yüklerin bağlı olduğu durumda THD analizleri gerçekleştirilip THD değişim indisleri hesaplanmıştır ve elde edilen sonuçlar Şekil 3.15'te verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre senkron generatörün bağlı olduğu durumda THD açısından yaşanan iyileşmelerin rüzgar çiftliğinin var olduğu duruma göre daha fazla olduğu gözlemlenmiştir.

Tüm sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde elde edilen sonuçların sisteme ve üretilen senaryoya özgü olduğu (sistem topolojisi) anlaşılmıştır. Bu noktada kaynakların farklı olması ya da uzaklık yakınlık durumundan ziyade sistemdeki yüklerin dağılımının farklı olması elde edilen sonuçlarda etkili olmuştur.

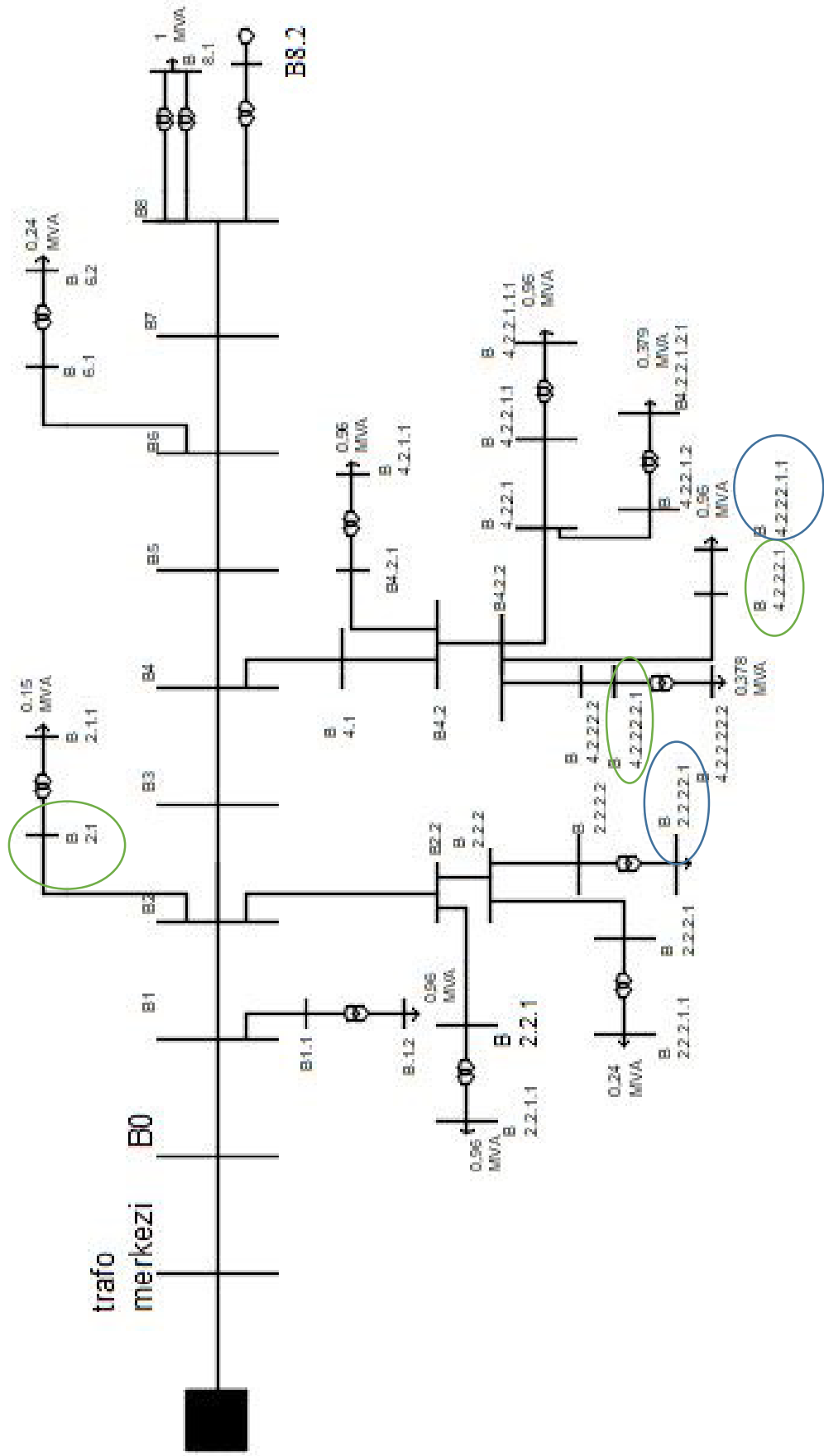
Test sisteminde en yakın bara (B2) için hem senkron generatör hem de rüzgar çiftliğinde THD indisi açısından en yüksek iyileşmenin yaşandığı bara B2.1 iken gerilim değişim indisi açısından en yüksek iyileşmenin yaşandığı bara B4.2.2.2.1'dir. En uzak bara incelendiğinde (B4.2.2.2), senkron generatörde B4.2.2.2.1, rüzgar çiftliğinde B4.2.2.2.2.1 THD indisi açısından en yüksek iyileşmenin yaşandığı baralarken hem senkron generatör hem de rüzgar çiftliğinde gerilim değişim indisi açısından en yüksek iyileşmenin yaşandığı bara B4.2.2.2.1.1'dir. Bu baralar Şekil 3.16'da işaretlenmiştir.



Şekil 3.14. Tüm sistemde farklı harmonik değerlerindeki yüklerin var olduğu durum için THD değişim indislerinin senkron genratör ve rüzgar çiftliği açısından kıyaslanması



Şekil 3.15. B4.2.2.2.1.1 ve B4.2.2.2.2.1 baralarında farklı harmonik değerlerindeki yüklerin tanımlı olduğu durumda B4.2.2.2.2 barasına ayrı ayrı senkron generatör ve rüzgar çiftliğinin bağlı olduğu durumlar için THD değişim indisleri açısından kıyaslanması



Şekil 3.16. İyileşmelerin en yüksek olduğu baralar

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Dağıtılmış üretim günümüzün bir gerçeği olup beraberinde bazı güç kalitesi problemlerini getirmektedir. Getirdiği problemlerin aksine bazı problemler için de çözüm sağlamaktadır. Günümüz teknolojileri ile birlikte sanayi sektöründe yaşanan ilerlemeler kaliteli bir güce duyulan ihtiyacı arttırmıştır. Bu noktada yaşanan güç kalitesi problemlerinin ekonomik, güvenlik ve güvenilirlik boyutları da dikkate alındığında söz konusu problemlerin doğru analiz edilerek giderilmesi konusu devreye girmektedir.

Güç kalitesi indisleri sistemde meydana gelen bozulma ve iyileşme durumlarını ölçeklendiren matematiksel göstergelerdir. Güç kalitesi bozukluklarının boyutunun ve bunların güç sistemleri üzerindeki olumsuz etkilerinin ölçülmesi güç kalitesi indisleri kullanılarak gerçekleştirilebilir. Bu indisler zaman veya frekans bilgisine dayanarak bir güç kalitesi olayının doğasını karakterize edebilmektedirler. Güç kalitesi indisleri aynı anda birkaç güç kalitesi bozukluğunu dikkate alabilir ya da dağıtılmış üretimin sistemde var olduğu ve olmadığı durumlar için güç kalitesi seviyelerini kıyaslayabilir.

Yapılan tez çalışmasında dağıtılmış üretim birimlerinin gücü ve sistemdeki konumu dikkate alınmıştır ve bahsi geçen iki parametrenin gerilim harmonikleri ve gerilim profili üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu amaçla İzmit 2 Trafo merkezine ait Rabak fiderinde yer alan en yakın, en uzak ve rastgele seçilen bir bara üzerinde çok sayıda benzetim çalışması gerçekleştirilerek, güç kalitesi indisleri aracılığı ile değerlendirme yapılmıştır. Ayrıca sistem indisleri üzerinden sistemin genel durumu hakkında fikir sahibi olmaya çalışılmıştır.

Analizler sonucunda dağıtılmış üretim birimlerinin sisteme entegrasyonu ile birlikte farklı harmonik mertebeleri de dahil olmak üzere THD'de ve gerilim profilinde gücün artması ve şebekeden uzaklaşmaya bağlı olarak iyileşmelerin yaşandığı tespit edilmiştir.

Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

1. Dikkate alınan indisler DÜK'lerin varlığında bir dağıtım şebekesinin güç kalitesi davranışını analiz etmek için yararlı bir araçtır.
2. DÜK'ün artan gücüyle birlikte harmonikler ve gerilim profilindeki iyileşmelerin arttığı görülmüştür.
3. Sisteme entegre edilen DÜK şebekeden uzaklaştıkça güç kalitesi problemlerinde meydana gelen iyileşmelerin arttığı gözlenmiştir.
4. Farklı harmonik seviyeleri için yine gücün artmasına ve şebekeden uzaklaşmaya bağlı olarak güç kalitesi seviyelerinde iyileşmelerin yaşandığı gözlemlenmiştir.
5. Senkron generatörün rüzgar çiftliğine kıyasla hem THD açısından hem de gerilim değişim indisi açısından daha fazla iyileştirme sağladığı tespit edilmiştir.
6. Bahsi geçen tüm bu indisler ile şebekelerin güç kalitesi seviyelerini temsil etmenin kolaylaşacağı gözlemlenmiştir.

Tez çalışmasının literatüre yaptığı temel katkı ise DÜK içeren sistemlerin güç kalitesi açısından incelenmesi ve bu indislerin farklı uygulama alanlarının tanıtılmasıdır.

Harmonikler ve gerilim düşmesi güç sistemleri için ele alınması gereken iki önemli bozulma çeşididir. Ancak güç sistemlerinde gözlemlenen ve güç sisteminin performansını önemli derecede etkileyen başka bozulma türleri de vardır. Gelecek çalışmalarda bu bozulma türleri için indisler vasıtasıyla güç kalitesi performansı üzerinde benzetim çalışmaları yapılarak indislerin etkisi gözlemlenebilir.

KAYNAKLAR

Ackermann T., Andersson G., Söder L., Distributed generation: a definition, *Electric Power Systems Research*, 2001, **57**(3), 195–204.

Alfieri L., Bracale A., Larsson A., New power quality indices for the assessment of waveform distortions from 0 to 150 kHz in power systems with renewable generation and modern non-linear loads, *Energies*, 2017, **10**(10), 1633.

Bajaj M., Singh, A. K., Power quality challenges associated with distributed generation planning: a simulation-based demonstration, *International Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering (UPCON)*, Aligarh, India, 8-10 November 2019.

Basa Arsoy A., Perdahçı C., Dağıtım Sistemlerinde Dağıtılmış Üretim, *Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu*, Bursa, Türkiye, 8-12 Aralık 2004.

Bawa A., Uthman M., Shaibu F. E., Oyewale K. S., Optimal Sizing and Sitting of Distributed Generation for Power Quality Improvement of Distribution Network, *European Journal of Engineering Research and Science*, 2019, **4**(10), 18–23.

Bollen M. H. J., Styvaktakis E., Gu I. H. Y., Categorization and Analysis of Power System Transients, *IEEE Transactions on power delivery*, 2005, **20**(3), 2298–2306.

Borges C. T., Falcao D. M., Impact of distributed generation allocation and sizing on reliability, losses and voltage profile, *2003 IEEE Bologna Power Tech Conference*, Bologna, Italy, 23-26 June 2003.

Brooks D. L., Dugan R. C., Wacławiak M., Sundaram A., Indices for assessing utility distribution system RMS variation performance, *IEEE transactions on power delivery*, 1998, **13**(1), 254–259.

Bracale A., Caramia P., Carpinelli G., Russo A., Verde P., Site and System Indices for Power-Quality Characterization of Distribution Networks with Distributed Generation, *IEEE Transactions On Power Delivery*, 2011, **26**(3), 1304–1316.

Cansever M., Dağıtılmış Üretim Kaynakları ile İstemli Ada Çalışma, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2015, 390438.

Caramia P., Carpinelli G., Verde P., *Power Quality Indices in Liberalized Markets*, 1st ed., Wiley, United Kingdom, 2009.

Caramia P., Di Perna C., Verde P., Buriola F., Stocco A., Turri R., Power quality indices of distribution networks with embedded generation, *41st International Universities Power Engineering Conference*, Newcastle-upon-Tyne, UK, 6-8 September 2006.

Cebrian J. C., Kagan N., Milanovic J. V., Probabilistic Estimation of Distribution Network Performance with Respect to Voltage Sags and Interruptions Considering Network Protection Setting—Part I: The Methodology, *IEEE Transactions On Power Delivery*, 2018, **33**, 42–51.

Chen T. H., Yang C. H., Hsieh T. Y., Case studies of the impact of voltage imbalance on power distribution systems and equipment, *8th WSEAS International Conference on Applied Computer and Applied Computational Science*, Canary Islands, Spain, 14-16 December 2009.

Cziker A., Miron A., Chindriş M., Wind generators impact on power systems, *Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 2010, **3**(1), 1–4.

Çakal G., Dağıtılmış üretim'e sahip elektrik dağıtım sistemlerinde, arıza akımı sınırlayıcılarının ve yerleşim yerlerinin etkilerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2012, 323688.

Dash P. K., Padhee M., Barik S. K., Estimation of power quality indices in distributed generation systems during power islanding conditions, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2012, **36**(1), 18–30.

Dougherty J. G., Stebbins W. L., Power quality: a utility and industry perspective, *1997 IEEE Annual Textile, Fiber and Film Industry Technical Conference*, Greenville, SC, USA, 6-8 May 1997.

Ekinci B., Basa Arsoy A., Güç Kalitesi İndisleri ile Dağıtılmış Üretim Sistemlerinin Değerlendirilmesi, *Elektrik-Elektronik ve Biyomedikal Mühendisliği Konferansı*, Bursa, Turkey, 26-28 November 2020.

Elbasuony G. S., Aleem S. H. A., Ibrahim A. M., Sharaf A. M., A unified index for power quality evaluation in distributed generation systems, *Energy*, 2018, **149**, 607–622.

Emmanuel P., Investigation into Transient Stability of a Nuclear Power Plant using DIGSILENT, Master of Science Thesis, University of Cape Town, Cape Town, 2015, Paper 95.

Erafşar Ö., Enterkonnekte Sisteme Bağlı Küçük Ölçekli Hidroelektrik Santrallerin Güç Kalitesine Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş, 2017, 456466.

Girigoudar K., Roald L. A., <https://arxiv.org/pdf/2004.10550.pdf> (Ziyaret Tarihi: 2 Ağustos 2020)

Godha N. R., Bapat V. N., Korachagaon I., Placement of Distributed Generation in Distribution Networks: A Survey on Different Heuristic Methods, Editors: Pawar P., Ronge B., Balasubramaniam R., Vibhute A., Apte S., Techno-Societal 2018, Springer, Cham, 693–707, 2020.

Guerrero J. M., Blaabjerg F., Zhelev T., Hemmes K., Monmasson E., Jemei S., Comech M. P., Granadino R., Frau J. I., Distributed generation: Toward a new energy paradigm, *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 2010, **4**(1), 52– 64.

Gutierrez J. J., Ruiz J., Lazkano A., Leturiondo L. A., Measurement of Voltage Flicker: Application to Grid-connected Wind Turbines, *Advances in Measurement Systems*, Editor: Sharma M. K., *Advances in Measurement Systems*, Intech, Croatia, 365–392, 2010.

Hadjsaid N., Canard J., Dumas F., Dispersed generation impact on distribution network, *IEEE Computer Applications in Power*, 1999, **12**(2), 22– 28.

Hamdy A., Abdelaziz A. Y., Badi M. A. E., Recognition of Power Quality Events Using Artificial Neural Networks, *The 2012 World Congress on Power and Energy Engineering (WCPEE'12)*, Cairo, Egypt, 23-27 December 2012.

IEEE Standards Board, IEEE Std. 1159-2019, IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality, IEEE, New York, 2019.

Jasiński M., Sikorski T., Kaczorowska D., Kostyła P., Leonowicz Z., Rezmer J., Bejmert D., Global Power Quality Index application in Virtual Power Plant, *12th International Conference and Exhibition on Electrical Power Quality and Utilisation (EPQU)*, Cracow, Poland, 14-15 September 2020.

Jouanne A., Banerjee B., Assessment of Voltage Unbalance, *IEEE Transactions On Power Delivery*, 2001, **16**(4), 782–790.

Kaddah S. S., El-Saadawi M. M., El-Hassanin D. M., Influence of distributed generation on distribution networks during faults, *Electric Power Components and Systems*, 2015, **43**(16), 1781–1792.

Keleş C., Kaygusuz A., <http://web.firat.edu.tr/feeb/kitap/C12/106.pdf> (Ziyaret Tarihi: 29 Ekim 2020).

Khadkikar V., Chandra A., A new control philosophy for a unified power quality conditioner (UPQC) to coordinate Load-Reactive power demand between shunt and series inverters, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2008, **23**(4), 2522–2534.

Kocaetepe C., Uzunoğlu M., Yumurtacı R., Karakaş A., Arıkan O., *Elektrik Tesislerinde Harmonikler.*, 1.ed., Birsen Yayınevi, İstanbul , 2003.

Kulu M., Güç Sistemlerinde Harmonik Kestirim Yöntemleri ve Performans Analizleri, Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 2020, 625567.

Küçükilhan G., Fotovoltaik Güç Sistemlerinin Modellenmesi ve Şebekeye Etkilerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar, 2017, 472923.

Mahela O. P., Khan B., Alhelou H. H., Tanwar S., Assessment of power quality in the utility grid integrated with wind energy generation, *IET Power Electronics*, 2020, **13**(13), 2917–2925.

Moghaddam M. J. H., Kalam A., Shi J., Nowdeh S. A., Gandoman F. H., Ahmadi A., A New Model for Reconfiguration and Distributed Generation Allocation in Distribution Network Considering Power Quality Indices and Network Losses, *IEEE Systems Journal*, 2020, **14**(3), 1–9.

Moreno-Munoz A., De-la-Rosa J. J. G., Lopez-Rodriguez M. A., Flores-Arias J. M., Bellido-Outerino F. J., Ruiz-de-Adana M., Improvement of power quality using distributed generation, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2010, **32**(10), 1069–1079.

Nagarajan A., Sivachandran P., Suganyadevi M. V., Muthukumar P., A study of UPQC: emerging mitigation techniques for the impact of recent power quality issues, *Circuit World*, DOI: 10.1108/CW-09-2019-0125.

Ogunjuyigbe A. S. O., Ayodele T. R., Akinola O. O., Impact of distributed generators on the power loss and voltage profile of sub-transmission network, *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, 2016, **3**(1), 94–107.

Olamaei J., Ebrahimi S., Moghassemi A., Compensation of voltage sag caused by partial shading in Grid-Connected PV system through the three-level SVM inverter, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2016, **18**, 107–118.

Peker A., Yörükören N., Basa Arsoy A., Dağıtım Sisteminde Harmonik Analizi ve Etkilerinin Dağıtılmış Üretim Kullanılarak Azaltılması, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 2017, **5**(1), 23–33.

Quintero-Molina V., Vega D., Mora U., Pavas A., Impact assessment of distributed generation on the power quality and reliability of distribution grid, *2015 IEEE Workshop on Power Electronics and Power Quality Applications (PEPQA)*, Bogota, Colombia, 2-4 June 2015.

Razavi S. E., Rahimi E., Javadi M. S., Nezhad A. E., Lotfi M., Shafie-khah M., Catalão J.P., Impact of distributed generation on protection and voltage regulation of distribution systems: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, **105**, 157–167.

Sağlam H., Dağıtım Transformatörlerinin Bağlantı Gruplarına Göre Harmonik Simülasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2005, 198990.

Shin Y. J., Powers E. J., Grady M., Arapostathis A., Power quality indices for transient disturbances, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2006, **21**(1), 253–261.

Siahkali H., Power Quality Indexes for Continue and Discrete Disturbances in a Distribution Area, *2nd IEEE International Conference on Power and Energy (PECon 08)*, Cairo, Egypt, 1-3 December 2008.

Silva E. N., Rodrigues A. B., da Silva M. D. G., Stochastic assessment of the impact of photovoltaic distributed generation on the power quality indices of distribution networks, *Electric Power Systems Research*, 2016, **135**, 59–67.

Singh G. K., Power system harmonics research: a survey, *European Transactions On Electrical Power*, 2009, **19**(2), 151–172.

Surajit C., Madhuchhanda M., Samarjit S., *Electric Power Quality*, 1 st ed., Springer Verlag, New York, 2011.

Tan R. H. G. Ramachandaramurthy V. K., Numerical Model Framework of Power Quality Events, *European Journal of Scientific Research*, 2010, **43**(1), 30–47.

Tekdemir İ. G., Alboyacı, B., Güç Salınımı Tespiti Yöntemlerinin Mesafe Koruma Rölesinin Çalışma Başarımı Açısından Karşılaştırılması, *Eleco 2014 Elektrik – Elektronik – Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği Sempozyumu*, Bursa, Türkiye, 27-29 Kasım 2014.

URL-1: https://www-lamp.digsilent.de/bottoms/DemoVersion/PowerFactory_A4_Low_Res.pdf (Ziyaret Tarihi: 13 Eylül 2020).

Varan M., Öylek İ., Dereli S., Üç Fazlı Senkron Bir Makinenin Değişken Yük Durumları için Geçici Hal Sonlu Eleman Analizi, *Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi*, 2017, **6**(ISMSIT2017), 59–72.

Wan-Zhong L., Tao L., Jian-Feng L., Power system low frequency oscillation detection using local mean decomposition algorithm, *BioTechnology*, 2014, **10**(20), 12423–12428.

Yazdani-Asrami M., Song W., Zhang M., Yuan W., Pei X., AC Transport Loss in Superconductors Carrying Harmonic Current with Different Phase Angles for Large-Scale Power Components, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2021, **31**(1), 1–5.

Yu J., Yang L., Analysis of Harmonic and Inter-Harmonic Based on Hilbert-Huang Transform, *2009 International Conference on Computational Intelligence and Software Engineering*, Wuhan, China, 11-13 December 2009.

Zeng Z., Yang H., Guerrero J. M., Zhao R., Multi-functional distributed generation unit for power quality enhancement, *IET Power Electronics*, 2015, **8**(3), 467–476.



EKLER

Ek-A

Digital Simulation of Electrical Networks içerisinde yer alan kelimelerin kısaltılmasıyla türetilen ve DigSilent olarak adlandırılan program tüm şebeke tip ve topolojileri için ilgili standartları baz alarak analiz işlemlerinin yapılması neticesinde güç sistemlerinin optimum bir şekilde planlanması ve işletilmesi için geliştirilmiştir. Günlük hayattaki gerçek şebeke problemlerine uygulanması ve çok büyük şebekeler için uygun yapısıyla güç sistemleri ile ilgili problemlere getirilecek çözüm noktasında dünya çapında geçerliliği bulunan ilk güç sistemi analizi programıdır (Emmanuel, 2015).

Yeni nesil teknolojilerin şebekeye entegrasyonunu irdelemek için geliştirilen DigSilent yazılımı güç sistemlerinin analiz edilebilmesi aşamasında kullanıcılarına eksiksiz bir işlev paketi sunan ideal bir araçtır (URL-1, 2020). Bu paket içerisinde yük akışı analizi, optimal yük akışı analizi, küçük sinyal analizi, kısa devre analizi, güç kalitesi analizleri başlığı altında harmonik, fliker, gerilim profili analizleri, kararlılık analizleri, güvenilirlik değerlendirmesi, geçici durum simülasyonu ve dağıtılmış üretim sistemlerinin analizi bulunmaktadır. DigSilent'in işlevleri sayesinde karmaşık güç sistemlerinin güvenliğini, kararlılığını ve ekonomisini iyileştirmek için analizler gerçekleştirilebilir. Sunduğu kütüphanede bulunan trafo, generatör, iletkenler, kablolar, kesici, röle, yük gibi elemanlar ile analizi yapılacak olan sistemlerin modellenmesini kolaylaştırır. Hızlı ve sağlam yük akışı algoritması, herhangi bir AC veya DC ağ topolojisine uygulanabilir. Bunların dışında DigSilent'in kullanıcılarına sağladığı özellikler:

- Tüm şebeke tiplerinin (3 faz, 3 faz-4 iletken, 2 faz, faz-nötr, DC şebeke) modellenmesi, analiz edilmesi, sonuçların elde edilmesi ve sonuçlara ait grafiklerin oluşturulması,
- Hızlı ve doğru yük akışı algoritmaları ile güç akışı analizlerinin yapılması,
- Kısa devre analizleri IEC60909, ANSI C37 standartlarına göre kısa devre analizlerinin yapılması,
- Hata türlerine göre analizlerin yapılması,
- Güç sistemi elemanlarının programın sağladığı arayüzde modellenmesi ve bu elemanlara ait veri tabanının oluşturulması,
- Kullanıcılarına geniş model kütüphanesi sunulması,

- Aktif ve reaktif güç dağıtımının ayrıntılı bir şekilde gösterilmesi,
- Güç sisteminde var olan elemanları tanımlamaya yardımcı olacak hat, generatör, transformatör, koruma ve kontrol, harmonik ve fliker verilerini sağlanması,
- Harmonik analizlerin yapılması şeklinde özetlenebilir.

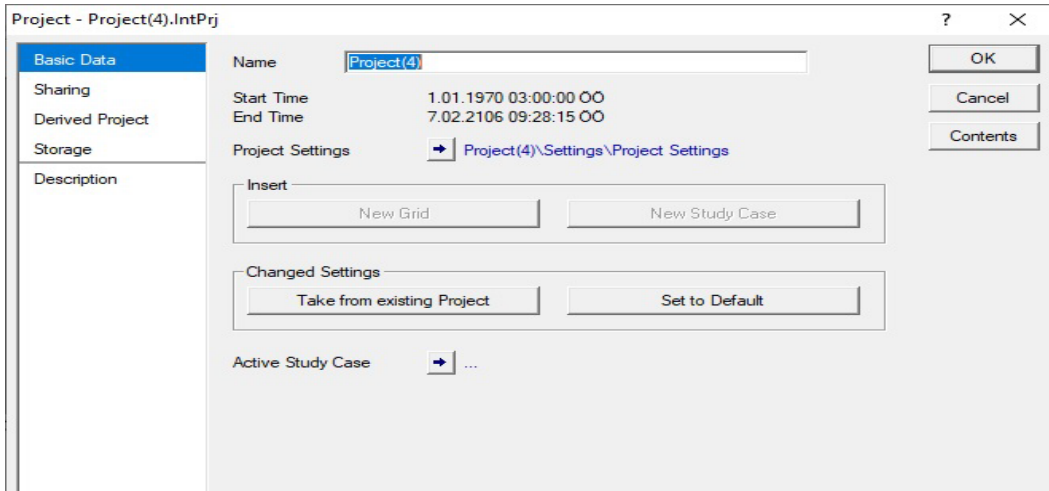
Bu tez DigSilent PowerFactory 15.1 versiyonu kullanılarak sistem modellemesi yapılmış ve tüm adımları ayrıntılı bir şekilde anlatılmıştır.

DigSilent ile Sistem Modelleme:

DigSilent, model oluşturma aşamasında kullanıcının ihtiyaç duyduğu sistemi her ne kadar büyük bir topolojiye sahip olsa da sunduğu arayüz ve bu arayüzde yer alan bileşenler ile esnek bir şekilde kurmaya olanak sağlar. Söz konusu modellemeyi gerçekleştirmek için uygulanacak adımlar sırasıyla aşağıdaki gibidir.

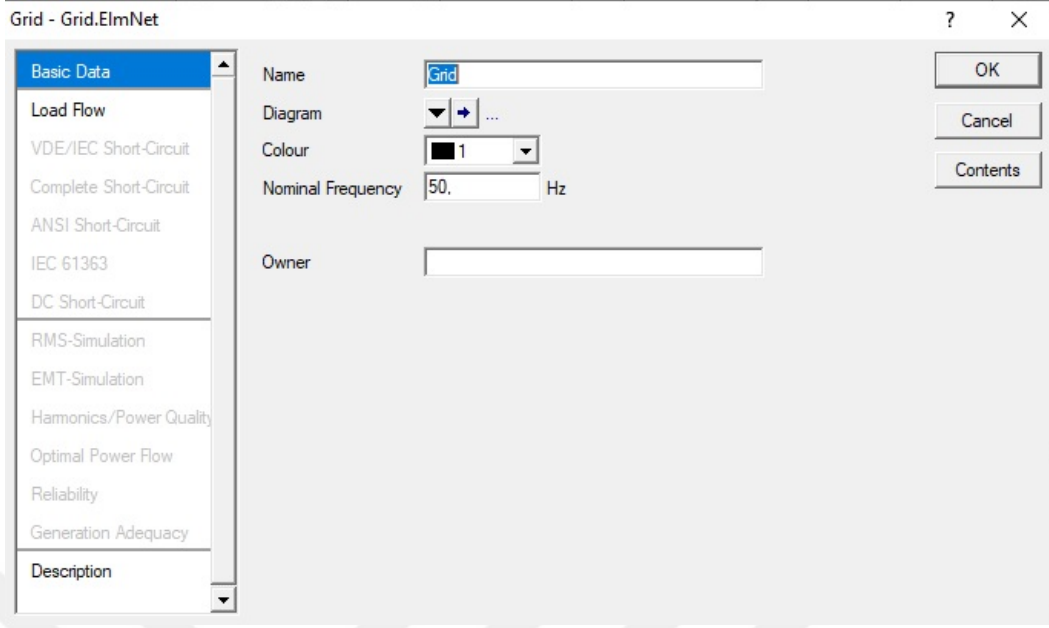
Proje oluşturma:

DigSilent arayüzünü açtığımızda araç çubuğunda yer alan File-New-Project'i seçtikten sonra karşımıza projenin isimlendirilmesini sağlayan Şekil A.1'deki pencere çıkar.



Şekil A.1. Proje isimlendirme penceresi

Proje isimlendirildikten sonra kurulacak olan şebekenin adlandırılması ve şebeke frekasının belirlenmesi için Şekil A.2'deki pencere karşımıza çıkar.



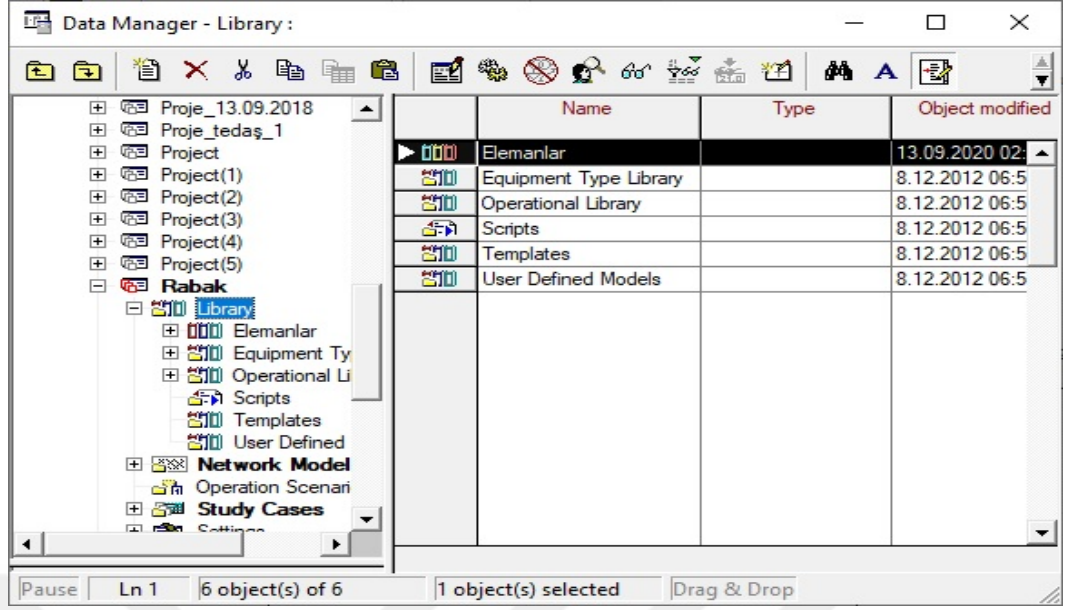
Şekil A.2. Şebekenin adlandırılması ve şebeke frekansının belirlenmesi penceresi

Bu tez kapsamında Türkiye'deki bir şebeke modelleneceği için şebeke frekansı değiştirilmeyip 50 Hz olarak bırakılmıştır. Bir sonraki adımda çizim alanının sınırlarını belirlemek için grafik araç çubuğunda yer alan Insert New Graphic sekmesi tıklanarak açılan pencerede yer alan Drawing Size alanından seçim işlemi yapılır ve ardından Execute butonuna basılır. Buradaki tercih tamamen kullanıcıya bırakılmıştır. Ardından kullanıcının karşısına çıkan pencerede yer alan Ok butonuna basılarak çizim alanı hazır hale gelmiş olur.

Modellenecek olan şebekede trafolar, baralar, iletkenler, kablolar, yükler, generatörler mevcut olduğu için sadece bu bileşenlerin modellenmesinden bahsedilecektir. Bileşenlerin modellenmesi esnasında modellemede kullanılacak olan bileşenlerin kolaylıkla çağırılması için kütüphane oluşturulur.

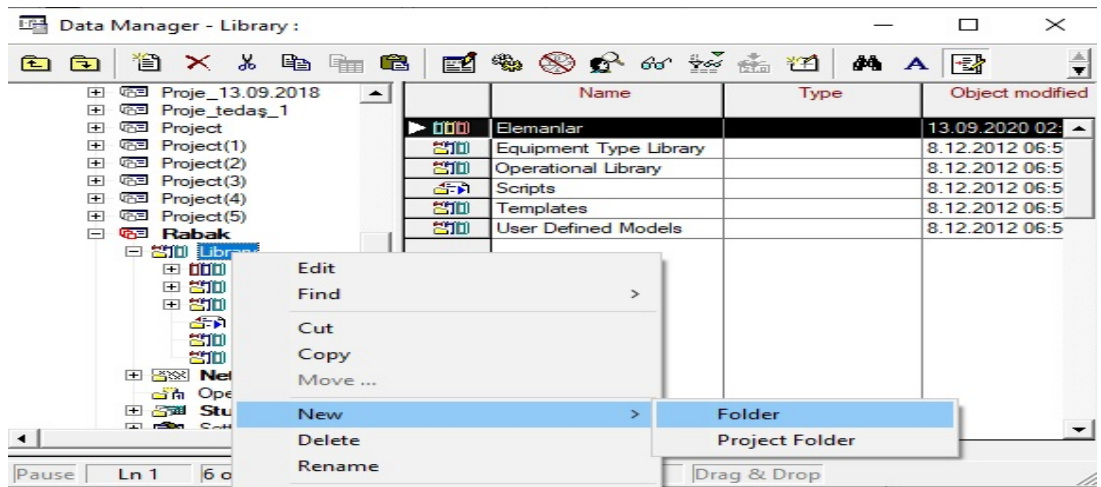
Kütüphane oluşturma ve eleman ekleme:

Kütüphane oluşturabilmek için araç çubuğunda yer alan Open Data Manager sekmesi kullanılır. Önümüze çıkan pencerede oluşturulan projenin adının altında yer alan Libray alt klasörü seçilir ve karşımıza Şekil A.3 çıkar.

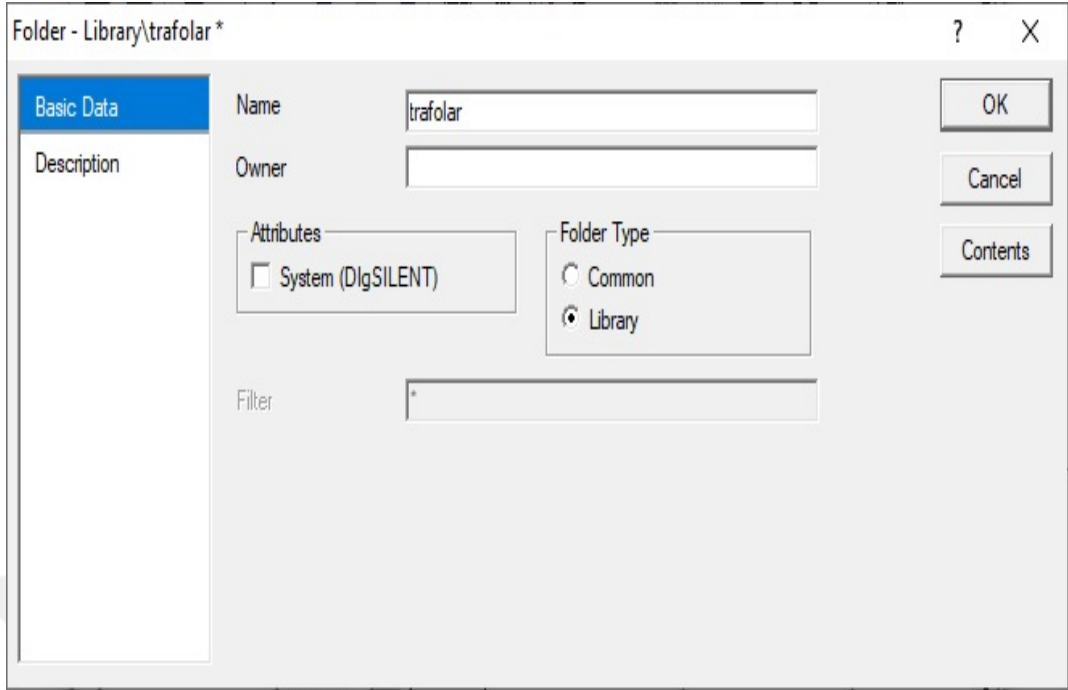


Şekil A.3. Kütüphane oluşturma penceresi

İsteğe bağlı olarak Library alt klasörü altına doğrudan eleman eklenebilir ya da Library altına yeni bir alt kütüphane oluşturulup eleman ekleme işlemi bu klasör içerisine yapılabilir. Sistem modellenirken anlaşılabilir olması açısından her bir eleman için alt kütüphanelerin açılması daha kullanışlı bir yapı sağlayacaktır. Örnek verecek olursak sistemde kullanılacak trafolar için trafolar kütüphanesi oluşturulabilir. Bunun için Library'ye sağ tıklanarak New-Folder seçenekleri ile önümüze çıkan pencerede Name alanına alt kütüphaneye verilecek isim girilirken Folder Type ise Library olarak seçilerek kütüphane içerisinde alt kütüphane oluşturulur. Alt kütüphane oluşturma işlemi aşağıda verilmiştir.

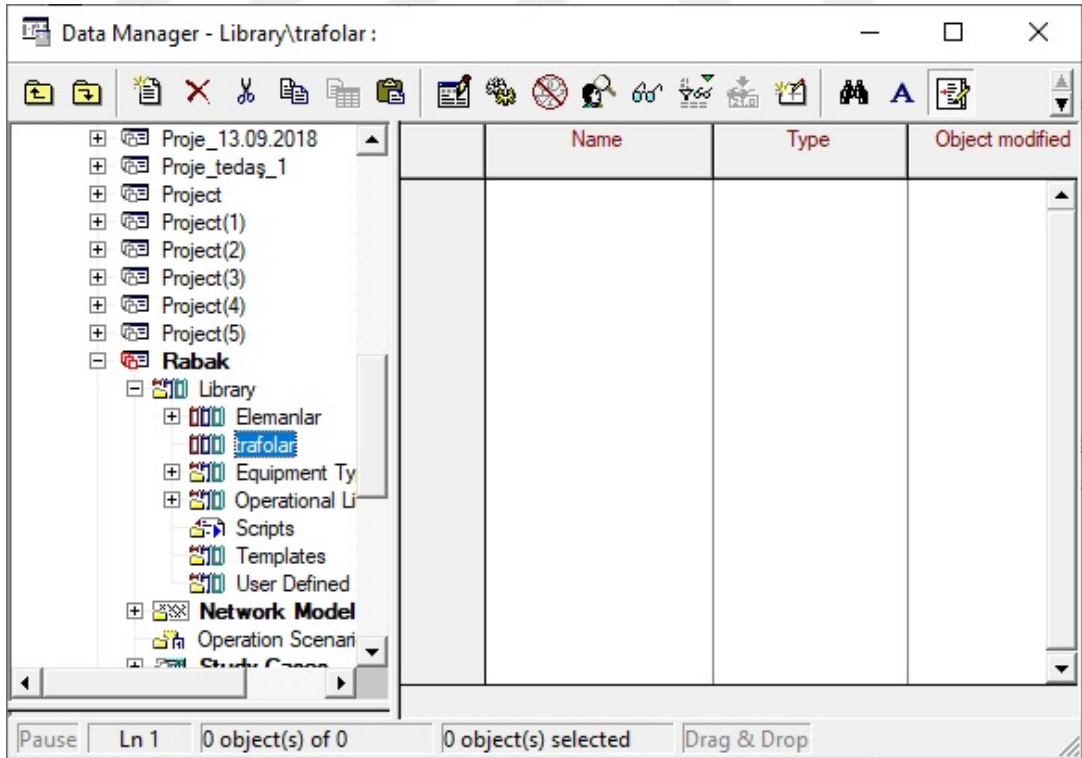


Şekil A.4. Alt kütüphane oluşturma penceresi 1. adım



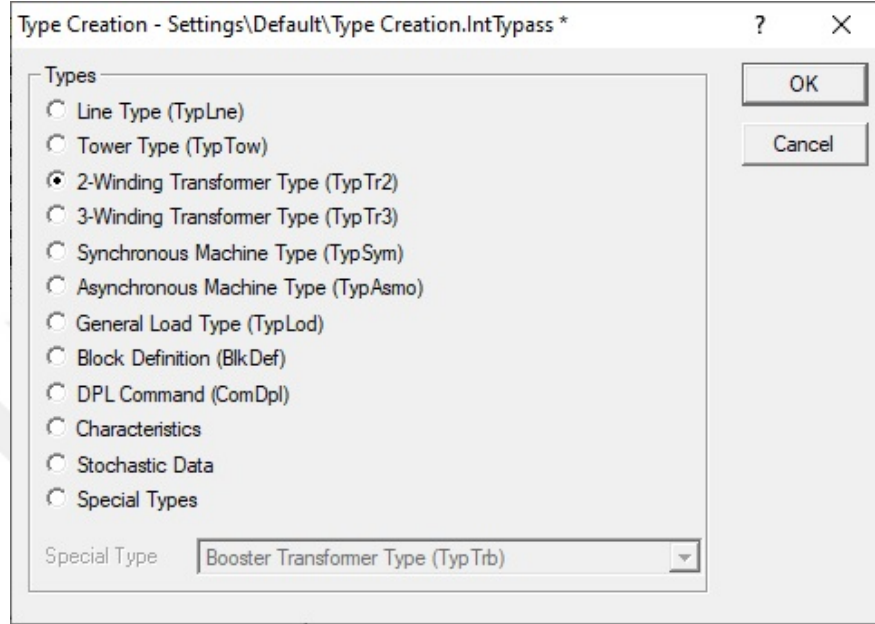
Şekil A.5. Alt kütüphane oluşturma penceresi 2. adım

Oluşturulan alt kütüphane Library'nin altında Şekil A.6'daki gibi görülecektir.



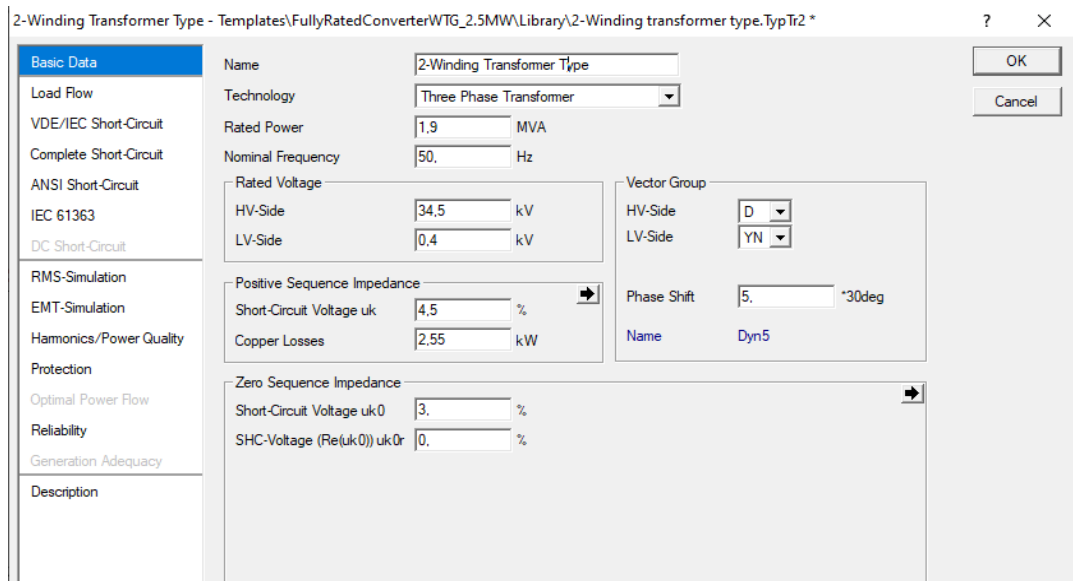
Şekil A.6. Oluşturulan alt kütüphaneyi gösteren pencere

Oluşturulan trafolar alt kütüphanesine eleman eklemek için Data Manager'ın araç çubuğunda yer alan New Object sekmesi tıklanır ve Type Creation penceresi açılır. Şekil A.7'de görüldüğü üzere açılan pencereden ilgili trafo elemanı seçilir ve Ok butonuna basılır.



Şekil A.7. Type Creation penceresi

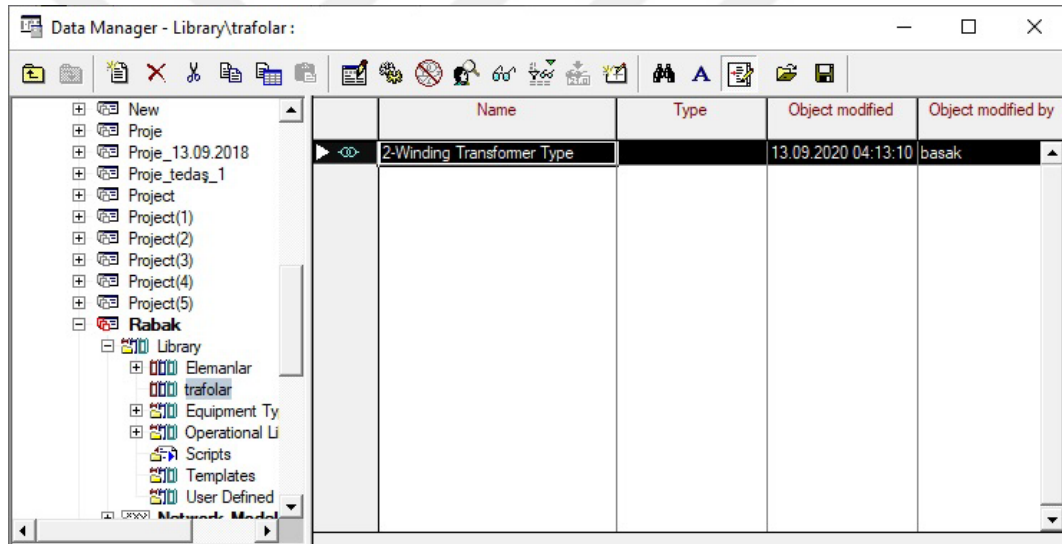
Şekil A.7'de modellemede kullanılacak olan iki sargılı trafo modeli seçilmiştir. Bu seçimin ardından açılan 2-Winding Transformer Type penceresi ile ilgili trafonun ismi ve diğer özellikleri belirlenir.



Şekil A.8. 2-Winding Transformer Type penceresi

Şekil A.8'i incelediğimizde karşımıza Basic Data'dan Load Flow'a, Harmonics/Power Quality'den Reliability'e kadar çeşitli sekmelerin çıktığı görülmüştür. Bu sekmeler bize ilgili eleman için gerekli verilerin girilmesini sağlamaktadır. Basic Data üzerinden gidecek olursak Technology alanı ile trafonun faz sayısı belirlenir. Rated Power ile trafonun nominal gücü belirlenir. Nominal Frequency ile trafonun hangi frekansta çalıştığı belirlenirken Rated Voltage ile trafonun primer ve sekonder devresine ait nominal gerilim değerleri belirlenir. Vector Group alanından trafonun primer ve sekonder devresine ait bağlantı tipleri belirlenir. Positive Sequence Impedance kısmından ise trafoya ait U_k değeri ile bakır kayıplarına ait değerler belirlenir.

Eleman ekleme işlemi bittiğinde eklenen elemanın kütüphane içerisindeki görünümü Şekil A.9'da verilmiştir.

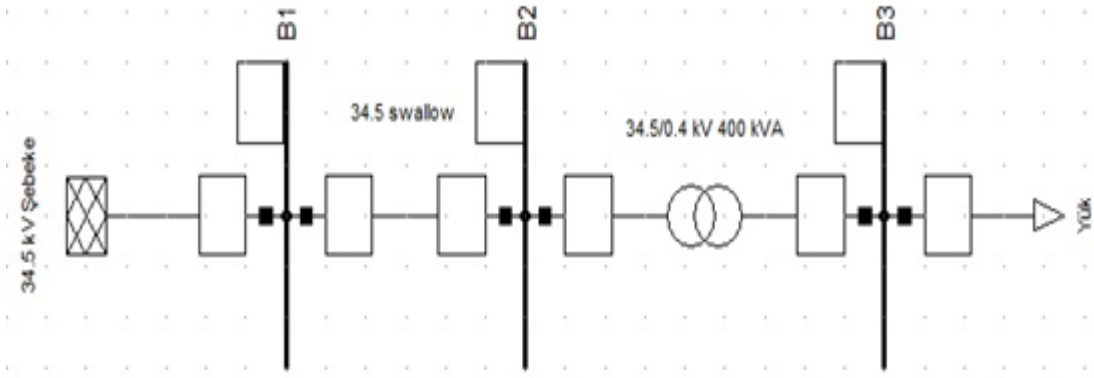


Şekil A.9. Eklenen elemanın kütüphanedeki görüntüsü

Sistemi modellemek için gereken tüm elemanlar ilgili alt kütüphanelere eklendikten sonra model oluşturma aşamasına geçilir.

Model oluşturma:

DigSilent ile model oluşturmaya anlaşılır hale getirebilmek için örnek bir sistem üzerinden adım adım ilerleyerek simülasyon çalışması yapılmıştır. Şekil A.10'da verilen örnek sistem baralar, şebeke, iletim hattı, trafo ve yük elemanlarından oluşmaktadır.



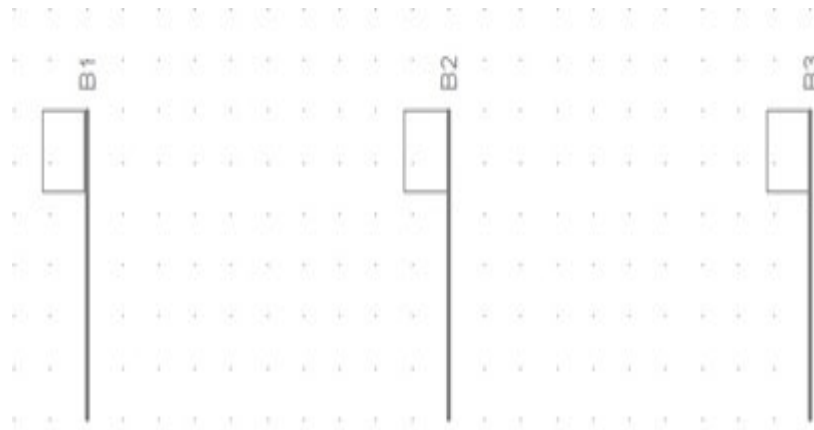
Şekil A.10. Örnek sistem

Örnek sistemi oluşturabilmek için öncelikli olarak yapılması gereken baraların yerleştirilmesidir. Bu programın yapısı ile ilgili bir durumdur. Baraları sisteme ekleyebilmek için ilk olarak Şekil A.11’deki çizim araç çubuğunda yer alan bara sembollerinden faydalanılır.



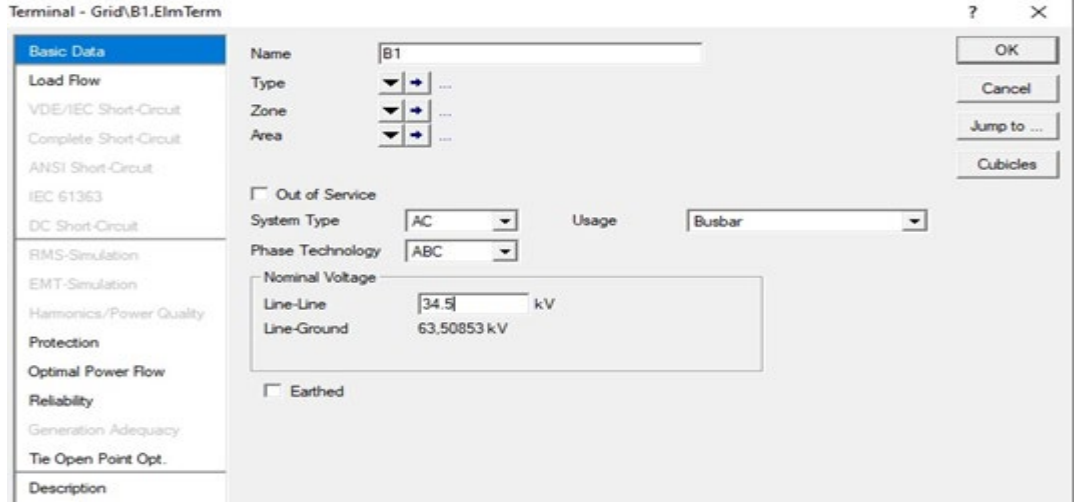
Şekil A.11. Çizim araç çubuğunda yer alan bara sembolleri

Seçtiğimiz bara sembolüne bağlı olarak baralar Şekil A.12’deki gibi yerleştirilir.




Şekil A.12. Baraların sisteme yerleştirilmiş hali

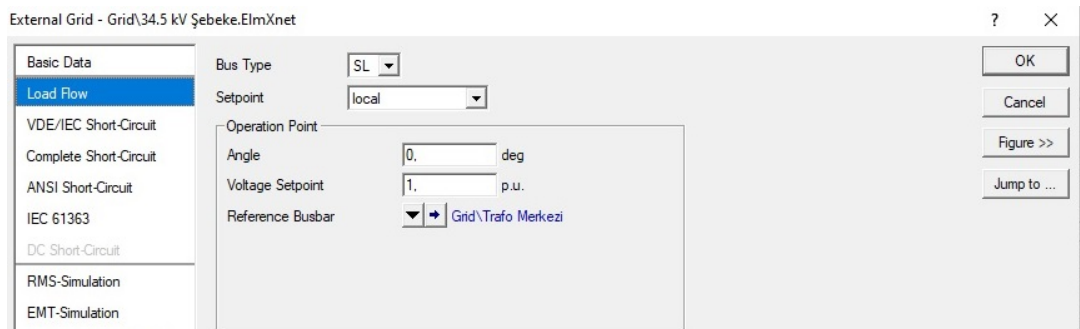
Bir baraya ait verilerin girilmesi için o baraya çift tıklanır ve verilerin girileceği Şekil A.13’teki pencere açılır.



Şekil A.13. Veri girme penceresi

Bara ile ilgili gerekli ayarlamaların yapılabilmesi için Basic Data kısmında yer alan bilgilerin girilmesi gerekmektedir. Örnek sistemdeki B1 barası üzerinden gidecek olursak yukarıda görüldüğü gibi Name alanına baranın ismi olan B1 girilmiştir. Alternatif akımdan beslenen bir şebeke olduğu için sistemin tipini belirten System Type'in değeri AC olarak seçilmiştir. Üç fazlı bir şebeke olduğu için faz sayısını temsil eden Phase Technology'nin değeri ABC olarak seçilmiştir. Bara gerilimi 34.5 kV olarak belirlendiği için Nominal Voltage başlığında yer alan Line-Line alanına 34.5 kV'luk değer girilmiştir. Aynı adımlar örnek sistemde yer alan B2 ve B3 baraları için tekrarlanmalıdır. Baralar grafik alanına yerleştirildikten sonra sırayla diğer sistem elemanları eklenmelidir.

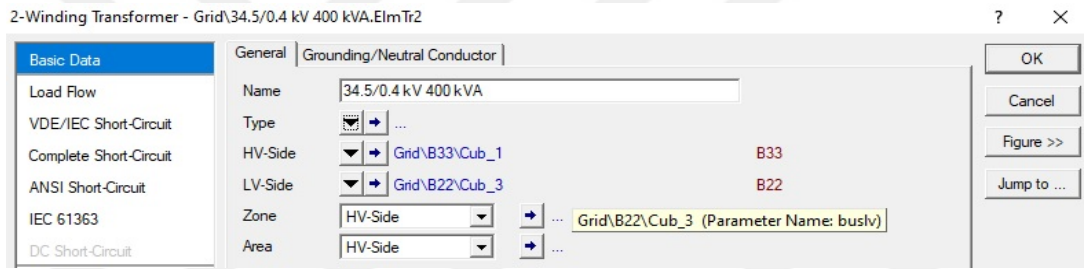
Kurulan sistemi besleyecek olan şebekenin grafik alanına eklenebilmesi için çizim araç çubuğunda yer alan External Grid  simgesi seçilir. Bu simgeye çift tıkladığında aşağıda gösterilen ve External Grid olarak adlandırılan pencere açılır ve gerekli ayarlamalar yapılır.



Şekil A.14. Extra Grid penceresi

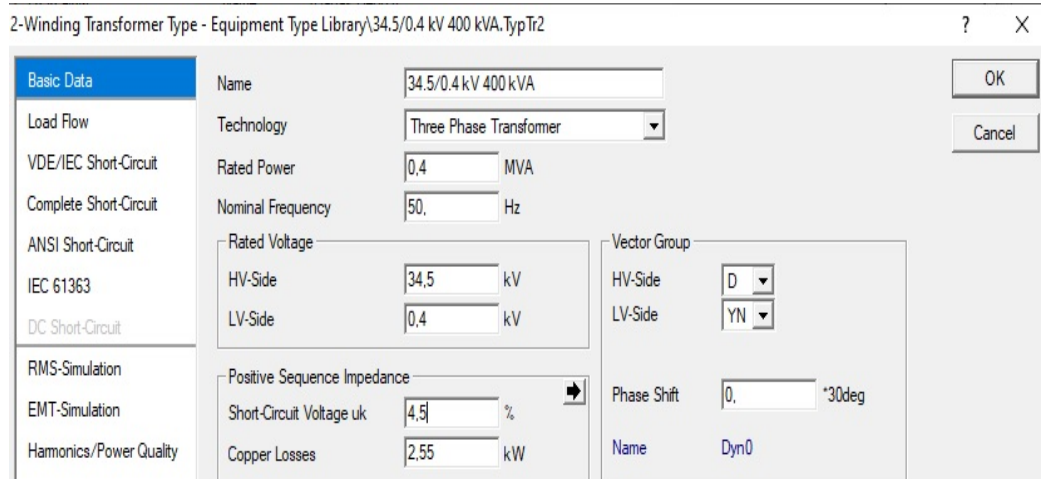
Şebeke ile ilgili ayarlamaların yapılabilmesi için açılan pencerede Load Flow sekmesinden gerekli veriler girilir. Örnek sistemde bara tipi slack olarak seçilmiştir. Slack olarak seçilmesi ise bara geriliminin ve açısının sabit olacağı anlamına gelir. Bu ayarlamalar Operation Point kısmında yer alır ve DigSilent tarafından otomatik olarak belirlenir.

Bir sonraki adımda B2 ve B3 baraları arasına transformatörün eklenmesi gerçekleştirilmiştir. Grafik ekranına eklenecek olan transformatör tipine uygun transformatör simgesi seçilir. Önerilen sistemde iki sargılı transformatör kullanıldığı için ismi 2-Winding Transformer simgesi seçilir. Transformatör grafik alanına eklendikten sonra üzerine çift tıklanarak Şekil A.15'te gösterilen 2-Winding Transformer isimli pencere açılır ve transformatör ile ilgili ayarlamalar yapılır.




Şekil A.15. 2-Winding Transformer penceresi

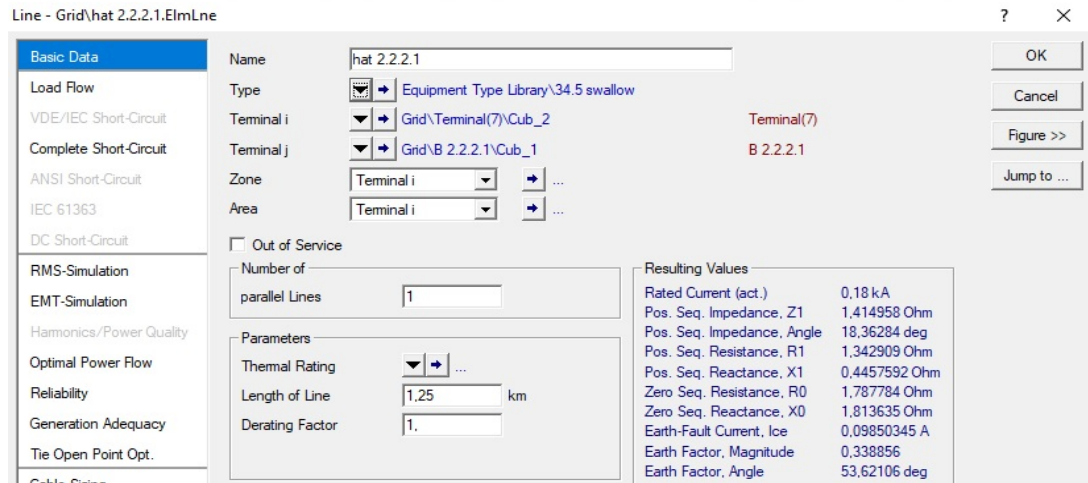
Bu pencerede yer alan Basic Data kısmında yer alan Type sekmesi kullanılarak tercihe bağlı olarak kütüphaneye eklenen transformatör çağırılabilir; ancak burada transformatör verileri manuel olarak girilecektir. Type sekmesi seçildiğinde New Project Type tıklanıp Şekil A.16'daki pencere açılacaktır.



Şekil A.16. 2-Winding Transformer özelliklerinin belirlendiği pencere

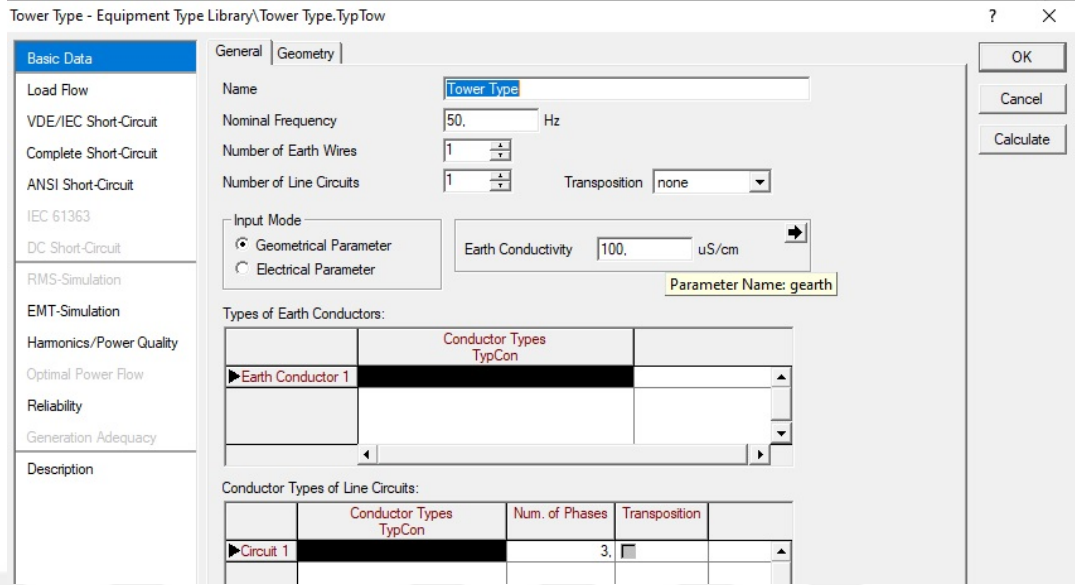
Bu pencerede yer alan Name kısmından transformatörün ismi girilir. Technology kısmından ise faz sayısına bağlı olarak transformatörün tipi girilir. Örnek sistemdeki transformatör üç fazlı olduğu için Technology alanı Three Phase Transformer olarak seçilmiştir. Rated Power alanından transformatöre ait nominal güç değeri girilirken Nominal Frequency alanından transformatörün çalıştığı frekans değeri verisi girilir. Rated Voltage alanından ise transformatörün primer ve sekonder devresine ait gerilim değerleri verileri girilir. Bu dört değer transformatörün kendine özgü değerleridir. Vector Group alanından transformatörün primer ve sekonder devresine ait bağlantı tipleri girilir. Sistemin primer devre bağlantısı üçgen olduğu için HV-Side değeri D, LV-Side değeri ise YN olarak seçilmiştir. Positive Sequence Impedance kısmından ise transformatöre ait U_k ve bakır kayıpları değeri girilir. Bu iki değer de transformatörün kendine özgü değerleridir.

Kurulan sistemdeki iletkene ait veriler kütüphaneden çağırılabilceği gibi manuel olarak da girilebilir. Her iki durumda da ilk olarak çizim araç çubuğunda yer alan Line simgesi  tıklanır ve örnek şebeke için B1 ve B2 baraları arasında yerleştirilir ve üzerine çift tıklanır. Ardından Şekil A.17'deki Line penceresi açılır.



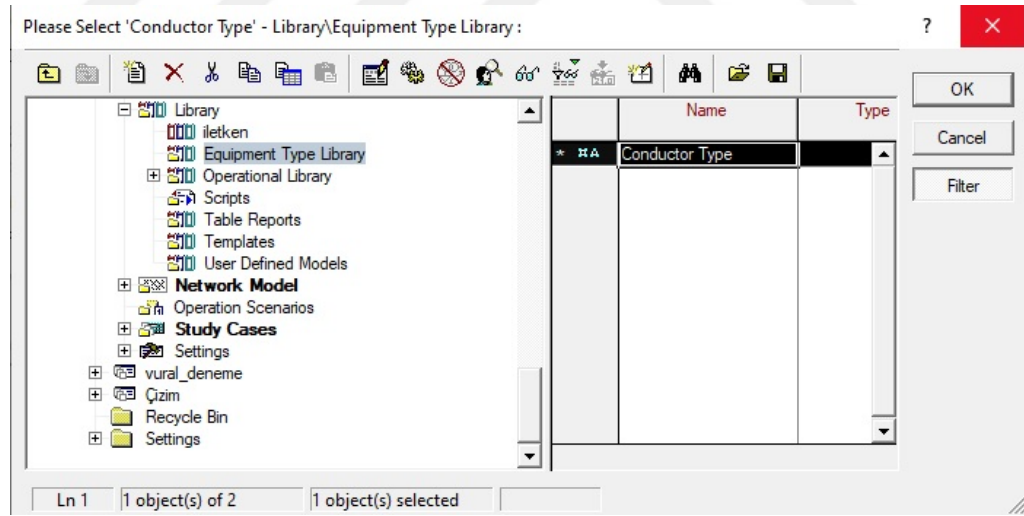
Şekil A.17. Line penceresi

Manuel giriş yapılırken Basic Data alanında yer alan Type sekmesinden New Project Type seçilir. Seçimin ardından dört seçenek sunulur. Bu sistemdeki gibi havai hat kullanılacak ise Tower Type seçilir ve Şekil A.18'deki pencere açılır.



Şekil A.18. Tower Type penceresi

Basic Data alanında yer alan General sekmesindeki Name'den iletken ismi girilir. Conductor Types of Line Circuits'ta yer alan Conductor Types TypCon alanına çift tıklanır ve Şekil A.19'daki pencere açılır.



Şekil A.19. Conductor Type penceresi

Conductor Type yazan alana sağ tıklanır ve sırasıyla New, Others seçenekleri seçilir ve Şekil A.20'de gösterilen pencere açılır.

Conductor Type - Equipment Type Library\Conductor Type(1).TypCon

Basic Data

Name: Conductor Type(1)

Nominal Voltage: 6. kV

Nominal Current: 1. kA

Number of Subconductors: 1

Conductor Model:

Solid Conductor

Tubular Conductor

(Sub-)Conductor:

DC-Resistance (20°C): 0.05 Ohm/km

GMR (Equivalent Radius): 11.682 mm

Outer Diameter: 30. mm

Skin effect

Şekil A.20. İletkene ait verilerin girildiği pencere

Açılan bu pencerede hatta kullanılan iletkenine bağlı olarak gerekli veriler girilir. Örnek sistemde kullanılan iletkenine ait veriler Şekil A.21’ deki gibidir.

Conductor Type - Equipment Type Library\Folder1\34.5 swallow TypCon

Basic Data

Name: 34.5 swallow

Nominal Voltage: 34.5 kV

Nominal Current: 0.18 kA

Number of Subconductors: 1

Conductor Model:

Solid Conductor

Tubular Conductor

(Sub-)Conductor:

DC-Resistance (20°C): 1.0742 Ohm/km

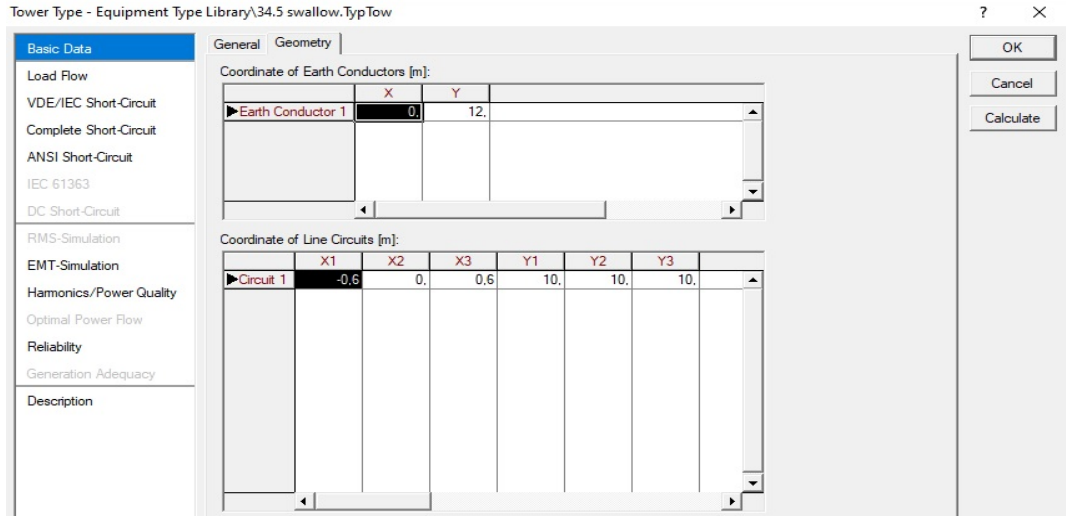
GMR (Equivalent Radius): 2.59182 mm

Outer Diameter: 7.14 mm

Skin effect


Şekil A.21. Swallow iletkenine ait verilerin girildiği pencere

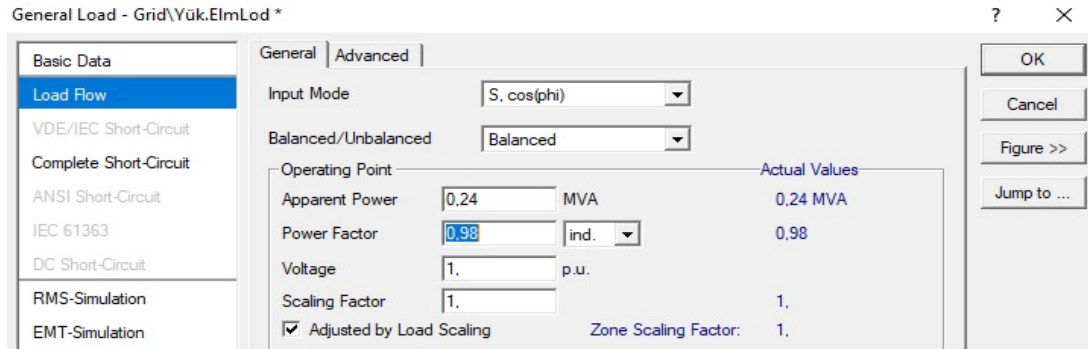
İletkenin tipi swallow olduğu için swallow iletkenine ait veriler girilmiştir. Ardından Basic Data alanında yer alan Geometry alanından hatta konumlandırılmasına ilişkin veriler girilir. Örnek sisteme ait bu verilerin girilmiş hali Şekil A.22’deki gibidir.



Şekil A.22. Swallow iletkeninin hatta konumlandırılması

Bu şekilde manuel olarak iletkene ait veri girişi yapılabildiği gibi daha önceden kütüphaneye eklenen veriler çağrılarak iletkenin özellikleri tanımlanabilir. Bunun için de sırasıyla Select Project Type, Tower Type seçilir ve kütüphaneye eklenmiş iletken tipleri görünür hale getirilir ve ilgili iletken tıklanarak özellikler belirlenir.

Modellenmenin son aşamasında örnek sistemde gösterildiği üzere B3 isimli baraya yük eklenir. Bunun için çizim araç çubuğundaki General Load simgesi  seçilir. Yüke ait özellikleri belirlemek için ise grafik alanındaki yük simgesine çift tıklanarak Şekil A.23'teki pencere açılır.

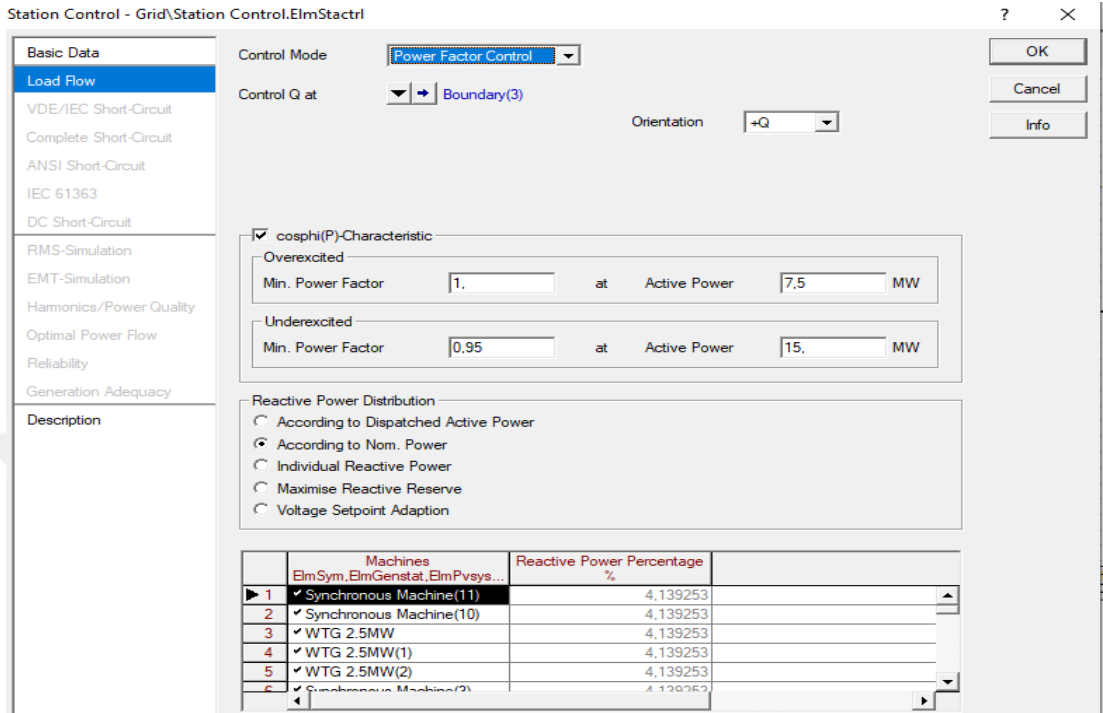


Şekil A.23. General Load penceresi

Dağıtılmış Üretim Kaynaklarının Tanımlanması:

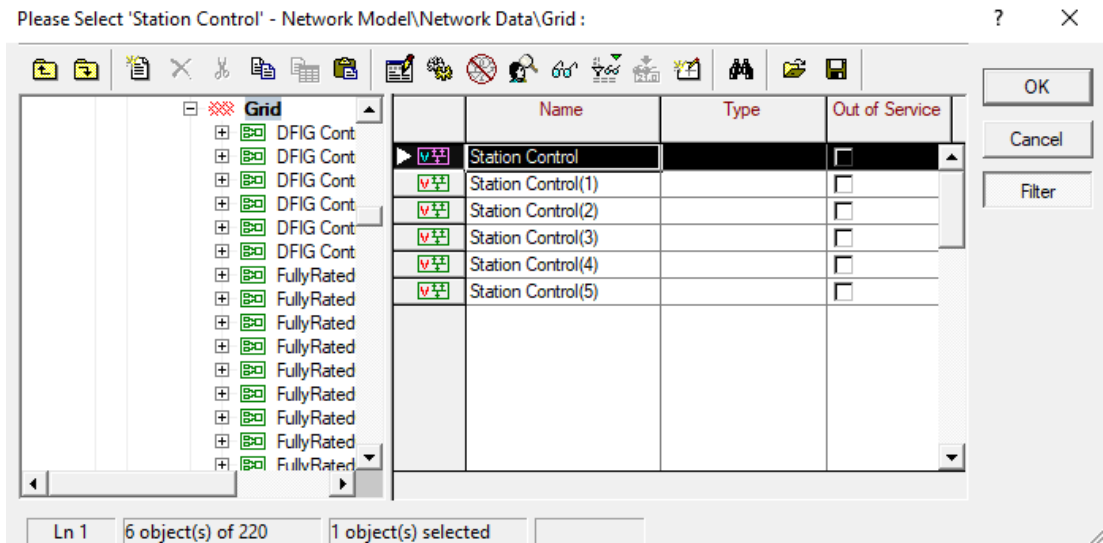
Senkron generatör sisteme trafo üzerinden bağlanır. Bağlandıktan sonra generatör üzerine sağ tıklanarak Define seçeneği üzerinden Station Control seçilir. Önümüze

gelen ekrandan Load Flow sekmesi seçilerek Şekil A.24'teki gibi ayarlamalar gerçekleştirilir.




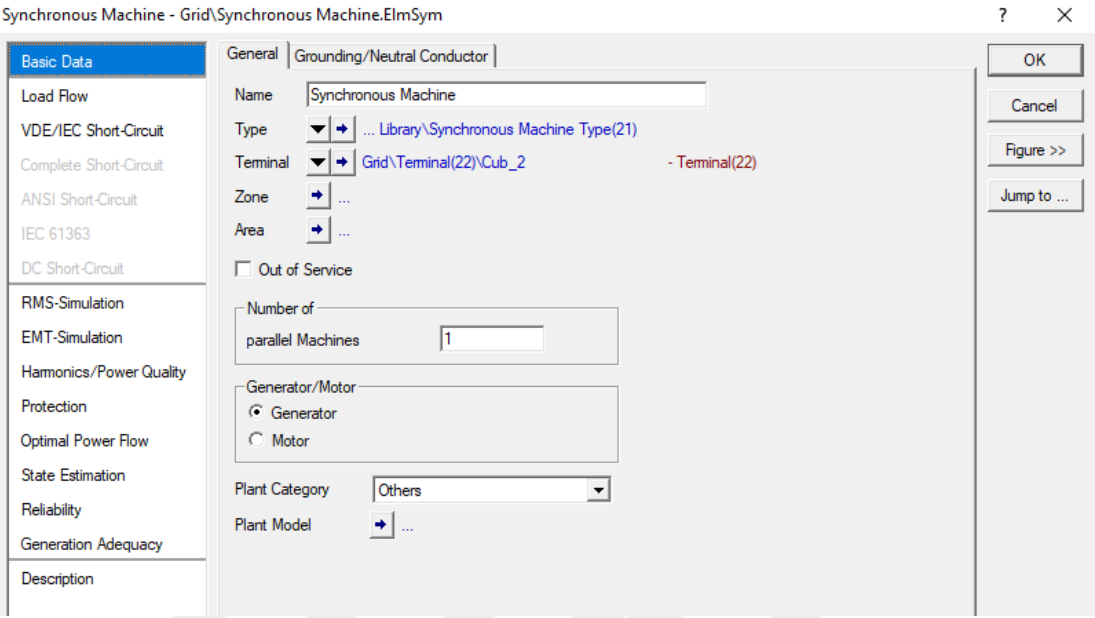
Şekil A.24. Load Flow sekmesi penceresi

Station Control tanımlandıktan sonra tanımlanan Controller'ı senkron generatöre eklemek gerekmektedir. Bunun için senkron generatöre sağ tıklanır Add To sekmesinden Station Control seçilir. Karşımıza Controller'ların tanımlı olduğu ekran çıkar ve ilgili Controller seçilerek OK butonuna tıklanır.



Şekil A.25. Contoller ekleme penceresi

Rüzgar çiftliği için çizim araç kutusundan General Templates () seçilir ve ilgili baraya bağlanır. Sonrasına senkron generatörde olduğu gibi önce bir Controller tanımlanır sonra bu Controller ilgili rüzgar çiftliğine eklenir.



Synchronous Machine - Grid\Synchronous Machine.ElmSym

Basic Data

General | Grounding/Neutral Conductor

Name: Synchronous Machine

Type: ... Library\Synchronous Machine Type(21)

Terminal: Grid\Terminal(22)\Cub_2 - Terminal(22)

Zone: ...

Area: ...

Out of Service

Number of parallel Machines: 1

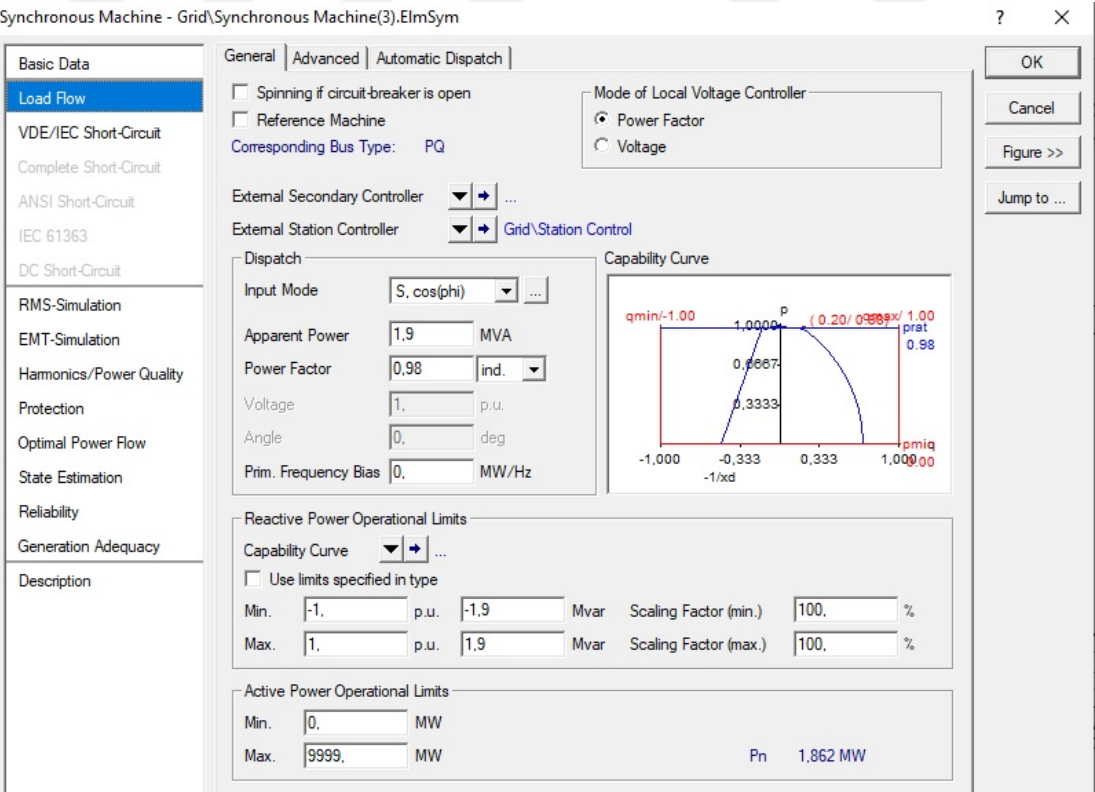
Generator/Motor: Generator Motor

Plant Category: Others

Plant Model: ...

OK, Cancel, Figure >>, Jump to ...

Şekil A.26. Senkron generatöre ait Basic Data bilgisinin girilmesi



Synchronous Machine - Grid\Synchronous Machine(3).ElmSym

Basic Data

Load Flow

VDE/IEC Short-Circuit

Complete Short-Circuit

ANSI Short-Circuit

IEC 61363

DC Short-Circuit

RMS-Simulation

EMT-Simulation

Hamonics/Power Quality

Protection

Optimal Power Flow

State Estimation

Reliability

Generation Adequacy

Description

General | Advanced | Automatic Dispatch

Spinning if circuit-breaker is open

Reference Machine

Corresponding Bus Type: PQ

Mode of Local Voltage Controller: Power Factor Voltage

External Secondary Controller: ...

External Station Controller: Grid\Station Control

Dispatch

Input Mode: S, cos(phi)

Apparent Power: 1.9 MVA

Power Factor: 0.98 ind.

Voltage: 1 p.u.

Angle: 0 deg

Prim. Frequency Bias: 0 MW/Hz

Capability Curve

Reactive Power Operational Limits

Capability Curve: ...

Use limits specified in type

Min. -1 p.u., -1.9 Mvar Scaling Factor (min.) 100 %

Max. 1 p.u., 1.9 Mvar Scaling Factor (max.) 100 %

Active Power Operational Limits

Min. 0 MW

Max. 9999 MW

Pn 1.862 MW

OK, Cancel, Figure >>, Jump to ...

Şekil A.27. Senkron generatöre ait Load Flow bilgisinin girilmesi

Şekil A.26 ve Şekil A.27’de senkron generatör verilerinin girildiği pencereler yer almaktadır.

Static Generator - Grid\WTG 2.5MW(3).ElmGenstat

Basic Data

General Zero Sequence/Neutral Conductor

Name: WTG 2.5MW(3)

Terminal: Grid\LV(3)\Cub_1 - LV(3)

Zone: ...

Area: ...

Out of Service

Technology: 3PH

Category: Wind Generator

Number of parallel Machines: 1

Ratings

Nominal Apparent Power: 1.9 MVA

Power Factor: 0.98

Model: Grid\FullyRatedConv Control(14)

Şekil A.28. Rüzgar çiftliğine ait Basic Data bilgisinin girilmesi

Static Generator - Grid\WTG 2.5MW(9).ElmGenstat

Basic Data

Load Flow

General Advanced Automatic Dispatch

Reference Machine

Local Voltage Controller: Power Factor

Corresponding Bus Type: PQ

External Secondary Controller: ...

External Station Controller: Grid\Station Control

Dispatch

Input Mode: S, cos(phi)

Apparent Power: 1.9 MVA

Power Factor: 0.98 ind.

Voltage: 1 p.u.

Angle: 0 deg

Droop: 1%

Prim. Frequency Bias: 0 MW/Hz

Reactive Power Operational Limits

Capability Curve: ...edConverterWTG_2.5MW\Library\WEA

Scaling Factor (min.): 100%

Scaling Factor (max.): 100%

Capability Curve Graph: pmax 1.32, prat 0.98, pmiq 0.98, (0.20/0.98)

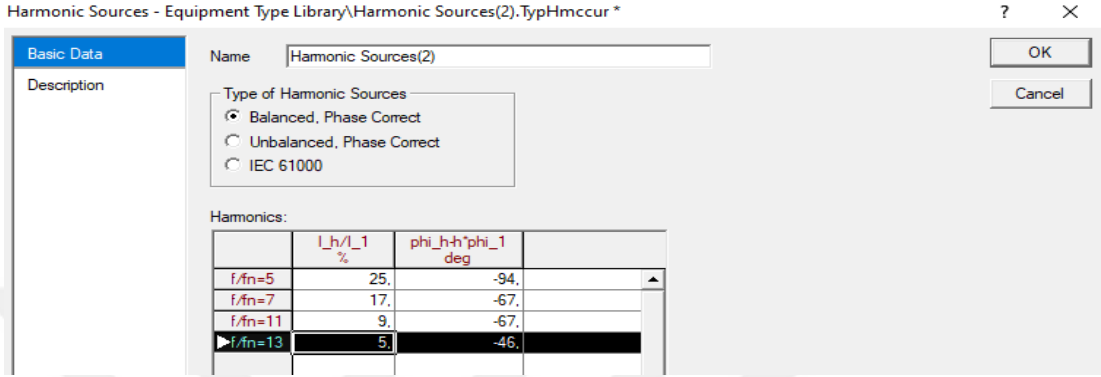
Şekil A.29. Rüzgar çiftliğine ait Load Flow bilgisinin girilmesi

Şekil A.28 ve Şekil A.29’da rüzgar çiftliğinin verilerinin girildiği pencereler yer almaktadır.

Harmonik Analizi:

1. Adım: Harmonik kaynağı tanımlama:

Model üzerinde harmonik analizi gerçekleştirilirken ilk olarak harmoniğe sebep olan bir eleman tanımlanmalıdır. Bu noktada kütüphanede bir harmonik kaynağı tanımlanır. Dengeli bir harmonik kaynağına ilişkin ayarlamalar aşağıdaki şekilde verilmiştir.

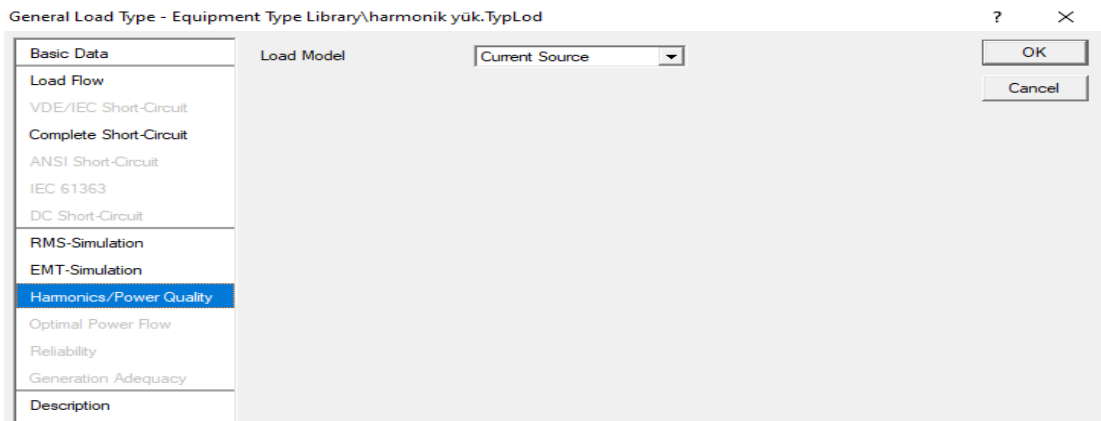


Şekil A.30. Harmonik kaynağına ait bilgilerin girilmesi

Şekil A.30'da 5., 7., 11. ve 13. mertebeden harmoniklerin faz açıları ve temel frekanstaki büyüklüğe oranları yüzdesel olarak belirtilmiştir.


2. Adım: Harmonik kaynağını sistem elemanına dahil etme:

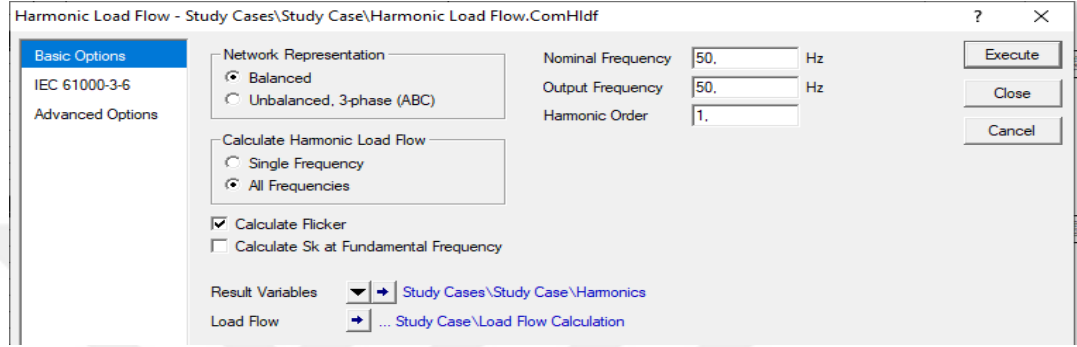
Kütüphaneye dahil ettiğimiz bu harmonik kaynağı modelde doğrudan yer almamaktadır. Belli bir sistem elemanına dahil edilerek kullanılabilir hale getirilir. Bu çalışmada harmonik kaynağı yük içerisinde dahil edilmiştir. Bu işlemi yapabilmek için takip edilecek adımlar sırasıyla: I) Basic Data kısmında yer alan Type sekmesinde yer alan ok işaretine tıklanır, II) Daha sonra Harmonics/Power Quality seçilir ve III) Load Model olarak Current Source seçilir.



Şekil A.31. Harmonik kaynağını sistem elemanına dahil etme

3. Adım: Harmonik analizi gerçekleştirme:

Yukarıdaki adımlar gerçekleştirildikten sonra harmonik analizini gerçekleştirmek için Calculate Harmonic Load Flow () simgesine tıklanır. Açılan pencerede gerekli ayarlamalar yapıldıktan sonra Execute butonuna basılarak harmonik analizi gerçekleştirilir.



Şekil A.32. Harmonik analizi gerçekleştirme

THD Değerlerinin Okunması:

Harmonik analizi gerçekleştirildikten sonra ana menu çubuğunda bulunan Output sekmesi tıklanır. Daha sonra Output Calculation Analysis seçeneği seçilir. Çıkan ekranda Busbars/Terminals seçilir ve Execute butonuna basılır. Çıktı penceresinden THD değerleri okunur.

	Rated Voltage [KV]	(50,00 Hz) [p.u.]	Bus-voltage (50,00 Hz) [deg]	RMS [p.u.]	Sum [p.u.]	Distortion (50,00 Hz) [%]	Total [%]
Trafo Merkezi	34,50	1,00	-0,00	1,00	1,08	4,17	8,19
IB1.1	34,50	0,99	-0,32	1,00	1,11	6,12	12,02
IB1.2	0,40	0,99	-1,85	0,99	1,22	11,93	23,36
IB2.1	34,50	0,99	-0,53	1,00	1,14	7,30	14,34
IB2.1.1	0,40	0,98	-1,97	0,99	1,23	13,09	25,64
IB4.2.2.1.1	34,50	0,98	-1,06	0,99	1,17	10,00	19,62
IB2.2.2.2.1(1)	0,40	0,97	-2,64	0,99	1,28	16,02	31,36
IB4.2.2.1.2	34,50	0,98	-1,05	0,99	1,17	9,82	19,28
IB2.2.2.2.1(2)	0,40	0,97	-2,60	0,99	1,28	15,82	30,98
IB4.2.1	34,50	0,98	-0,98	0,99	1,17	9,46	18,57
IB2.2.2.2.1(3)	0,40	0,98	-2,55	0,99	1,27	15,42	30,20
IB6.1	34,50	0,99	-0,93	0,99	1,16	9,07	17,81
IB2.2.2.2.1(4)	0,40	0,98	-2,44	0,99	1,27	15,00	29,38
IB 2.2.1	34,50	0,99	-0,53	1,00	1,14	7,35	14,43
IB 2.2.1.1	0,40	0,99	-2,07	0,99	1,24	13,19	25,83
IB 2.2.2.1	34,50	0,99	-0,54	0,99	1,14	7,41	14,56

Şekil A.33. THD değerlerinin okunduğu pencere

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Ekinci B., Basa Arsoy A., Güç Kalitesi İndisleri ile Dağıtılmış Üretim Sistemlerinin Değerlendirilmesi, *Elektrik-Elektronik ve Biyomedikal Mühendisliği Konferansı*, Bursa, Türkiye, 26-28 Kasım 2020.



ÖZGEÇMİŞ

Başak Ekinci ilk ve orta öğrenimini Trabzon'da, lise öğrenimini Çanakkale'de tamamladı. 2009 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü'nden 2013 yılında mezun oldu. 2013 yılından beri Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine devam etmektedir. Aynı zamanda 2017 yılından itibaren Türkiye Elektrik Dağıtım Anonim Şirketine Elektrik Mühendisi olarak çalışmaktadır.

