

T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ



HARMONİK BOZULMAYA SAHİP DAĞITIM SİSTEMLERİNDE
FOTOVOLTAİK DAĞITIK ÜRETİM BİRİMİ BARINDIRMA KAPASİTESİNİN
İYİLEŞTİRİLMESİ

ALP KARADENİZ

DOKTORA

Jüri Üyeleri : Doç. Dr. M. Erhan BALCI (Tez Danışmanı)
Prof. Dr. M. Hakan HOCAOĞLU
Dr. Öğr. Üyesi Tuba GÖZEL
Dr. Öğr. Üyesi S. Ahmet SİS
Dr. Öğr. Üyesi Fuat KILIÇ

BALIKESİR, ARALIK-2019

KABUL VE ONAY SAYFASI

Alp KARADENİZ tarafından hazırlanan “HARMONİK BOZULMAYA SAHİP DAĞITIM SİSTEMLERİNDE FOTOVOLTAİK DAĞITIK ÜRETİM BİRİMİ BARINDIRMA KAPASİTESİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 5 Aralık 2019 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği ile Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Danışman

Doç. Dr. M. Erhan BALCI
Balıkesir Üniversitesi

Üye

Prof. Dr. M. Hakan HOCAOĞLU
Gebze Teknik Üniversitesi

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Tuba GÖZEL
Gebze Teknik Üniversitesi

Üye

Dr. Öğr. Üyesi S. Ahmet SİS
Balıkesir Üniversitesi

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Fuat KILIÇ
Balıkesir Üniversitesi

İmza

Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Prof. Dr. Necati ÖZDEMİR

ETİK BEYAN

Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak tarafımda hazırlanan “**Harmonik Bozulmaya Sahip Dağıtım Sistemlerinde Fotovoltaik Dağıtım Üretim Birimi Barındırma Kapasitesinin İyileştirilmesi**” başlıklı tezde;

- Tüm bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Kullanılan veriler ve sonuçlarda herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Tüm bilgi ve sonuçları bilimsel araştırma ve etik ilkelere uygun şekilde sunduğumu,
- Yararlandığım eserlere atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,

beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Alp KARADENİZ

Bu tez çalışması “TÜBİTAK 1001” tarafından “116E110” nolu proje dahilinde desteklenmiştir.

ÖZET

**HARMONİK BOZULMAYA SAHİP DAĞITIM SİSTEMLERİNDE
FOTOVOLTAİK DAĞITIK ÜRETİM BİRİMİ BARINDIRMA KAPASİTESİNİN
İYİLEŞTİRİLMESİ
DOKTORA
ALP KARADENİZ
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
(TEZ DANIŞMANI: DOÇ. DR. M. ERHAN BALCI)
BALIKESİR, ARALIK 2019**

Bu tezde, öncelikle, programlanabilir gerilim kaynağı, yük ve evirici devreli dağıtık üretim birimi (fotovoltaik dağıtık üretim birimi: FDÜB) barındıran bir test sistemi kurulmuştur. Sistemden elde edilen ölçüm verileri ile test sisteminde yer alan FDÜB için harmonik akım kaynağı (HAK), Norton eşdeğer devre (NED) ve çapraz frekans admittans matris (ÇFAM) modelleri oluşturulmuştur. Bu modellerin, FDÜB'lerin sisteme enjekte ettiği harmonik akımlarının hesabında yaptıkları hataların analizi, aynı test sisteminde elde edilen çok sayıda ölçüm referans alınarak istatistiksel şekilde değerlendirilmiştir. Yapılan analiz neticesinde, modellerin hassasiyet bakımından en iyiden en kötüye NED, ÇFAM ve HAK şeklinde sıralandığı görülmüştür.

İkinci olarak, sırasıyla en pratik ve en hassas modeller olan HAK ve NED modelleri, harmonik etkileşim analizi (HEA) ve tam harmonik güç akışı (THGA) algoritmalarına entegre edilmiştir. Böylece, HEA-HAK, HEA-NED, THGA-HAK ve THGA-NED algoritma-model çiftlerinin, FDÜB'lerin yanı sıra doğrusal ve doğrusal olmayan yüklerin de bulunduğu IEEE 33 baralı test sistemi için sonuçları analiz edilmiştir.

Son olarak, baralara ait en yüksek toplam gerilim harmonik bozulma (THDV) değerinin minimizasyonu, bara gerilimlerinin rms sapma değerinin minimizasyonu ve sistemin FDÜB barındırma kapasitesinin maksimizasyonunu amaçlayan optimal FDÜB ve pasif filtre (PF) planlama yaklaşımı önerilmiştir. Ayrıca, optimal PF planlama çalışmalarının gelenekselleşmiş amacı olan THDV minimizasyonu, optimal FDÜB ve PF planlama probleminin amaç fonksiyonu olarak ele alınmıştır. Her iki yaklaşımın sonuçları, geleneksel FDÜB planlama kısıtları ile IEEE 519 standardında tanımlı gerilim harmonik sınır değerleri kısıt olarak dikkate alınarak; IEEE 33 baralı test sistemi için analiz edilmiştir. Model-algoritma çiftlerinin optimal planlama yaklaşımlarının sonuçlarına etkisi analizler sırasında yorumlanmıştır.

ANAHTAR KELİMELELER: Fotovoltaik dağıtık üretim birimleri, harmonik analiz yöntemleri, harmonik yüklerin modellenmesi, optimal boyutlandırma ve yerleştirme, pasif filtreler, optimizasyon algoritmaları.

ABSTRACT

IMPROVEMENT OF FOTOVOLTAIC DISTRIBUTED GENERATION UNIT HOSTING CAPACITY IN HARMONICALLY DISTORTED DISTRIBUTION SYSTEMS

DOCTOR OF PHILOSOPHY
ALP KARADENİZ

BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
ELECTRICAL-ELECTRONICS ENGINEERING
(SUPERVISOR: ASSOC. PROF. DR. M. ERHAN BALCI)
BALIKESİR, DECEMBER - 2019

Firstly, a test system consisting of a programmable voltage source, a load and a distributed generation unit with inverter interface (a photovoltaic distributed generation unit: PDGU) was established. With the measurements taken from this system, harmonic current source (HCS), Norton equivalent circuit (NEC) and crossed frequency admittance matrix (CFAM) models were provided for the PDGU. The error analysis of these models for the current harmonics calculation was obtained statistically by regarding actual measurement results provided from the test system as reference values. The analysis shows that NEC, CFAM and HCS were ranked from the best to the worst in terms of their sensitivity.

Secondly, the most practical and the most sensitive models, HCS and NEC, are integrated into the harmonic penetration analysis (HPA) and complete harmonic power flow (CHPF) algorithms. Thus, the results of HPA-HCS, HPA-NEC, CHPF-HCS and CHPF-NEC were analyzed for IEEE 33 bus system consisting of PDGU, linear and non-linear loads.

Finally, optimal PDGU and passive filter (PF) planning approach is proposed for minimizing the highest voltage total harmonic distortion ($THDV_M$) value of the buses, minimizing rms deviation of bus voltages, and maximizing the system's PDGU capacity. Besides, a traditional aim of optimal PF planning studies, THDV minimization, is handled as objective of optimal PDGU and PF planning problem. By regarding conventional PDGU planning constraints and voltage harmonic limitations of IEEE 519 standard as constraints, the results of both approaches were analyzed in IEEE 33 bus system. The effects of algorithm-model pairs on the results were also evaluated.

KEYWORDS: Photovoltaic distributed generation units, harmonic analysis algorithms, harmonic generating load models, optimal sizing and placement, passive filters, optimization algorithms.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

| | |
|--|------------|
| ÖZET | i |
| ABSTRACT | ii |
| İÇİNDEKİLER | iii |
| ŞEKİL LİSTESİ | v |
| TABLO LİSTESİ | vii |
| SEMBOL LİSTESİ | ix |
| ÖNSÖZ | x |
| 1. GİRİŞ | 1 |
| 1.1 Tezin Amacı..... | 2 |
| 1.2 Tezin Sınırları | 3 |
| 1.3 Tezin İçeriği | 4 |
| 2. LİTERATÜR ÖZETİ | 6 |
| 2.1 Fotovoltaik Dağıtık Üretim Birimleri | 6 |
| 2.1.1 FDÜB'ler İçin Evirici Bağlantı Konfigürasyonları..... | 8 |
| 2.1.2 Evirici Devre Topolojileri | 10 |
| 2.2 FDÜB'lerin Şebekeye Olumsuz Etkileri ve Bağlantı Standartları | 12 |
| 2.2.1 Gerilim Dalgalanmaları ve Yükselmeleri | 13 |
| 2.2.2 Harmonik Bozulmaya Sahip Akımlar | 14 |
| 2.3 Pasif Harmonik Filtreler | 15 |
| 2.4 Harmonik Yük Akışı Analizi | 18 |
| 2.4.1 Harmonik Üreten Yük ve Dağıtık Üretim Birimi Modelleri: HAK, NED ve ÇFAM | 19 |
| 2.4.2 Harmonik Analiz Algoritmaları | 21 |
| 2.4.2.1 Harmonik Etkileşim Analizi (HEA)..... | 21 |
| 2.4.2.2 Tam Harmonik Güç Akışı (THGA) | 23 |
| 2.5 Güç Sistemlerinin Dağıtık Üretim Birimleri İçin Harmonik Kısıtlı Barındırma Kapasitesi | 25 |
| 2.6 Sonuç..... | 29 |
| 3. MODELLERİN ÖLÇÜM TEMELLİ HASSASİYET ANALİZİ | 31 |
| 3.1 Test Sisteminin Tanıtılması | 31 |
| 3.2 FDÜB'lerin Bozulmuş Gerilim Dalga Şekilleri Altında Davranışı..... | 33 |
| 3.3 Modellerin Hata Analizi | 38 |
| 3.4 Sonuç..... | 42 |
| 4. IEEE 33 BARALI TEST SİSTEMİ İÇİN HARMONİK YÜK AKIŞI ALGORİTMALARININ KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ | 44 |
| 4.1 Senaryo 1 için Analiz Sonuçları | 45 |
| 4.2 Senaryo 2 için Analiz Sonuçları | 48 |
| 4.3 Senaryo 3 için Analiz Sonuçları | 50 |
| 4.4 Sonuç..... | 53 |
| 5. HARMONİK KİRLİLİĞE SAHİP GÜÇ SİSTEMLERİ İÇİN OPTİMAL FDÜB VE PF PLANLAMA YAKLAŞIMLARI | 54 |
| 5.1 THDV Minimizasyonu Temelli Yaklaşım..... | 55 |

| | |
|--|------------|
| 5.2 Gerilim Profilini ve FDÜB Barındırma Kapasitesini En İyileştirme Temelli Yaklaşım | 56 |
| 5.3 Balina Optimizasyon Algoritmasıyla Optimal FDÜB ve PF Planlama Probleminin Çözümü | 57 |
| 5.3.1 Avın Kuşatılması..... | 57 |
| 5.3.2 Ava Yaklaşma Yöntemi | 58 |
| 5.3.3 Yeni Av Arama | 60 |
| 5.4 THDV Minimizasyonu Temelli Yaklaşım için Analiz Sonuçları..... | 63 |
| 5.4.1 Senaryo 4 için Sonuçlar | 63 |
| 5.4.2 Senaryo 5 için Sonuçlar | 67 |
| 5.5 Gerilim Profilini ve FDÜB Barındırma Kapasitesini En İyileştirme Temelli Yaklaşım için Analiz Sonuçları | 71 |
| 5.5.1 Senaryo 4 için Sonuçlar | 72 |
| 5.5.2 Senaryo 5 için Sonuçlar | 76 |
| 5.6 Sonuç..... | 81 |
| 6. SONUÇ..... | 83 |
| 7. KAYNAKLAR | 86 |
| EKLER | 94 |
| EK A: THDV minimizasyon temelli yaklaşıma göre optimal FDÜB ve PF planlama kodları | 94 |
| EK A.1: HEA-HAK algoritma-model çifti dikkate alınarak hazırlanan kodlar | 94 |
| EK A.2: HEA-NED algoritma-model çifti dikkate alınarak hazırlanan kodlar | 96 |
| EK A.3: THGA-HAK algoritma-model çifti dikkate alınarak hazırlanan kodlar | 99 |
| EK A.4: THGA-NED algoritma-model çifti dikkate alınarak hazırlanan kodlar..... | 101 |
| EK B: Gerilim profili ve FDÜB barındırma kapasitesi en iyileştirme temelli yaklaşıma göre optimal FDÜB ve PF planlama kodları..... | 105 |
| EK B.1: HEA-HAK algoritma-model çifti dikkate alınarak hazırlanan kodlar | 105 |
| EK B.2: HEA-NED algoritma-model çifti dikkate alınarak hazırlanan kodlar..... | 106 |
| EK B.3: THGA-HAK algoritma-model çifti dikkate alınarak hazırlanan kodlar | 109 |
| EK B.4: THGA-NED algoritma-model çifti dikkate alınarak hazırlanan kodlar..... | 112 |
| EK C: Optimal planlama problemlerinin çözümünde kullanılan BO algoritması kodları | 115 |
| EK D: IEEE 33 baralı test sisteminin hat verileri..... | 120 |
| EK E: Harmonik üreten yüklerin (HÜY) harmonik modelleri..... | 121 |
| EK F: FDÜB'lerin harmonik modelleri..... | 122 |
| ÖZGEÇMİŞ | 124 |

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

| | |
|---|----|
| Şekil 2.1: Tipik bir FDÜB'ün yapısı [15]. | 7 |
| Şekil 2.2: (a) Büyük güçlü FDÜB'ler, (b) küçük güçlü FDÜB'ler [4]. | 8 |
| Şekil 2.3: Evirici konfigürasyonları. | 8 |
| Şekil 2.4: FV sistemler için evirici topolojileri [15]. | 11 |
| Şekil 2.5: FDÜB'lerin bulunduğu sistemlerde gerilim seviyesinin güç akışının yönüne bağlı değişimi [7]. | 14 |
| Şekil 2.6: (a) Tek ayarlı, (b) iki ayarlı, (c) üç ayarlı, (d) sönümlü iki ayarlı ve (e) C tipi paralel pasif filtrelerin tek faz eşdeğer devreleri. | 17 |
| Şekil 2.7: (a) Tek ayarlı, (b) iki ayarlı ve sönümlü iki ayarlı, (c) üç ayarlı ve (d) C tipi pasif filtrelerin empedans karakteristikleri. | 17 |
| Şekil 2.8: (a) HAK, (b) NED ve (c) ÇFAM modellerinin eşdeğer devreleri. | 19 |
| Şekil 2.9: HEA'nın akış diyagramı. | 23 |
| Şekil 2.10: THGA'nın akış diyagramı. | 25 |
| Şekil 3.1: Test sisteminin şematiği. | 31 |
| Şekil 3.2: Test sisteminin fotoğrafı. | 32 |
| Şekil 3.3: Sinüzoidal gerilim altında fotovoltaiik birimin %25, %50, %75 ve %100 yüklenme durumları için akım harmonik spektrumları. | 33 |
| Şekil 3.4: Sinüzoidal gerilim ile %3, %5 ve %8 THDV değerlerine sahip test gerilimleri altında, %100 yüklenme durumu için fotovoltaiik birimin akım harmonik spektrumları. | 34 |
| Şekil 3.5: THDV=%3 bozulmaya sahip ve birbirinden farklı harmonik bileşenler içeren 100 adet gerilim dalga şekli altında (a) %25, (b) %50, (c) %75 ve (d) %100 yüklenme durumlarında fotovoltaiik birimin akımına ait THDI histogramları. | 35 |
| Şekil 3.6: THDV=%5 bozulmaya sahip ve birbirinden farklı harmonik bileşenler içeren 100 adet gerilim dalga şekli altında (a) %25, (b) %50, (c) %75 ve (d) %100 yüklenme durumlarında fotovoltaiik birimin akımına ait THDI histogramları. | 36 |
| Şekil 3.7: THDV=%8 bozulmaya sahip ve birbirinden farklı harmonik bileşenler içeren 100 adet gerilim dalga şekli altında (a) %25, (b) %50, (c) %75 ve (d) %100 yüklenme durumlarında fotovoltaiik birimin akımına ait THDI histogramları. | 36 |
| Şekil 3.8: (a) THDV=%3 ve P/Pn=%25, (b) THDV=%5 ve P/Pn=%25, (c) THDV=%8 ve P/Pn=%25, (d) THDV=%3 ve P/Pn=%100, (e) THDV=%5 ve P/Pn=%100 ile (f) THDV=%8 ve P/Pn=%100 durumlarında HAK modelinin Hata _{TDD} (%) histogramları. | 39 |
| Şekil 3.9: (a) THDV=%3 ve P/Pn=%25, (b) THDV=%5 ve P/Pn=%25, (c) THDV=%8 ve P/Pn=%25, (d) THDV=%3 ve P/Pn=%100, (e) THDV=%5 ve P/Pn=%100 ile (f) THDV=%8 ve P/Pn=%100 durumlarında NED modelinin Hata _{TDD} (%) histogramları. | 40 |
| Şekil 3.10: (a) THDV=%3 ve P/Pn=%25, (b) THDV=%5 ve P/Pn=%25, (c) THDV=%8 ve P/Pn=%25, (d) THDV=%3 ve P/Pn=%100, (e) THDV=%5 ve P/Pn=%100 ile (f) THDV=%8 ve P/Pn=%100 durumlarında ÇFAM modelinin Hata _{TDD} (%) histogramları. | 41 |
| Şekil 4.1: IEEE 33 baralı test sistemi tek hat diyagramı. | 45 |

| | |
|--|----|
| Şekil 4.2: Senaryo 1 için algoritma-model çiftlerine ait bara THDV değerleri..... | 46 |
| Şekil 4.3: Senaryo 1 için algoritma-model çiftlerine ait bara V_{RMS} değerleri..... | 46 |
| Şekil 4.4: Senaryo 2 için algoritma-model çiftlerine ait bara THDV değerleri..... | 48 |
| Şekil 4.5: Senaryo 2 için algoritma-model çiftlerine ait bara V_{RMS} değerleri..... | 49 |
| Şekil 4.6: Senaryo 3 için algoritma-model çiftlerine ait bara THDV değerleri..... | 51 |
| Şekil 4.7: Senaryo 3 için algoritma-model çiftlerine ait bara V_{RMS} değerleri..... | 51 |
| Şekil 5.1: Baloncuk ağı arama tekniği [90]..... | 59 |
| Şekil 5.2: Spiral olarak konum güncelleme [90]..... | 60 |
| Şekil 5.3: BO algoritmasına ait pseudo-kod..... | 61 |
| Şekil 5.4: Balina optimizasyon algoritmasının akış diyagramı..... | 62 |
| Şekil 5.5: THDV minimizasyonu temelli optimal FDÜB ve PF planlama yaklaşımına ait problemin senaryo 4 için çözümü sonucu elde edilen bara THDV değerleri..... | 66 |
| Şekil 5.6: THDV minimizasyonu temelli optimal FDÜB ve PF planlama yaklaşımına ait problemin senaryo 4 için çözümü sonucu elde edilen bara V_{RMS} değerleri..... | 66 |
| Şekil 5.7: THDV minimizasyon temelli optimal FDÜB ve PF planlama yaklaşımına ait problemin senaryo 4 için iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değerinin (AF) değişimi..... | 67 |
| Şekil 5.8: THDV minimizasyon temelli optimal FDÜB ve PF planlama yaklaşımına ait problemin senaryo 5 için çözümü sonucu elde edilen bara THDV değerleri..... | 70 |
| Şekil 5.9: THDV minimizasyon temelli optimal FDÜB ve PF planlama yaklaşımına ait problemin senaryo 5 için çözümü sonucu elde edilen bara V_{RMS} değerleri..... | 70 |
| Şekil 5.10: THDV minimizasyon temelli optimal FDÜB ve PF planlama yaklaşımına ait problemin senaryo 5 için çözümünde iterasyon sayısı ile AF değişimi..... | 71 |
| Şekil 5.11: Gerilim profilini ve FDÜB barındırma kapasitesini en iyileştirme temelli optimal FDÜB ve PF planlama yaklaşımına ait problemin senaryo 4 için çözümü sonucu elde edilen bara THDV değerleri..... | 74 |
| Şekil 5.12: Gerilim profilini ve FDÜB barındırma kapasitesini en iyileştirme temelli optimal FDÜB ve PF planlama yaklaşımına ait problemin senaryo 4 için çözümü sonucu elde edilen bara V_{RMS} değerleri..... | 75 |
| Şekil 5.13: Gerilim profilini ve FDÜB barındırma kapasitesini en iyileştirme temelli optimal FDÜB ve PF planlama yaklaşımına ait problemin senaryo 4 için çözümünde iterasyon sayısı ile AF değerinin değişimi..... | 76 |
| Şekil 5.14: Gerilim profilini ve FDÜB barındırma kapasitesini en iyileştirme temelli optimal FDÜB ve PF planlama yaklaşımına ait problemin senaryo 5 için çözümü sonucu elde edilen bara THDV değerleri..... | 79 |
| Şekil 5.15: Gerilim profilini ve FDÜB barındırma kapasitesini en iyileştirme temelli optimal FDÜB ve PF planlama yaklaşımına ait problemin senaryo 5 için çözümü sonucu elde edilen bara V_{RMS} değerleri..... | 80 |
| Şekil 5.16: Gerilim profilini ve FDÜB barındırma kapasitesini en iyileştirme temelli optimal FDÜB ve PF planlama yaklaşımına ait problemin senaryo 5 için çözümünde iterasyon sayısı ile AF değerinin değişimi..... | 81 |

TABLO LİSTESİ

Sayfa

| | |
|---|----|
| Tablo 2.1: Literatürdeki önemli çalışmaların amaç fonksiyon ve sınır kavramları..... | 29 |
| Tablo 3.1: IEC 61000–3–6’da tanımlı gerilim harmonik sınır değerleri..... | 33 |
| Tablo 3.2: Şekil 3.5’de sunulan THDI histogramlarının ortalama, ortanca ve standart sapma değerleri..... | 37 |
| Tablo 3.3: Şekil 3.6’da sunulan THDI histogramlarının ortalama, ortanca ve standart sapma değerleri..... | 37 |
| Tablo 3.4: Şekil 3.7’de sunulan THDI histogramlarının ortalama, ortanca ve standart sapma değerleri..... | 37 |
| Tablo 3.5: HAK modelinin $Hata_{TDD}$ (%) histogramlarının ortalama, ortanca ve standart sapma değerleri..... | 40 |
| Tablo 3.6: NED modelinin $Hata_{TDD}$ (%) histogramlarının ortalama, ortanca ve standart sapma değerleri..... | 40 |
| Tablo 3.7: ÇFAM modelinin $Hata_{TDD}$ (%) histogramlarının ortalama, ortanca ve standart sapma değerleri..... | 41 |
| Tablo 4.1: Güncellenmiş IEEE 33 baralı test sisteminin baralara bağlı yüklerin aktif ve reaktif güçleri..... | 45 |
| Tablo 4.2: Senaryo 1 için algoritma-model çiftlerine ait iterasyon sayıları ve çalışma süreleri..... | 48 |
| Tablo 4.3: Senaryo 2 için algoritma-model çiftlerine ait iterasyon sayıları ve çalışma süreleri..... | 50 |
| Tablo 4.4: Senaryo 3 için algoritma-model çiftlerine ait iterasyon sayıları ve çalışma süreleri..... | 53 |
| Tablo 5.1: THDV minimizasyonu temelli optimal FDÜB ve PF planlama yaklaşımına ait problemin senaryo 4 için çözümü sonucu elde edilen FDÜB baraları ve güçleri..... | 64 |
| Tablo 5.2: THDV minimizasyonu temelli optimal FDÜB ve PF planlama yaklaşımına ait problemin senaryo 4 için çözümü sonucu elde edilen PF baraları, temel frekans reaktif güçleri ve ayarlandıkları harmonik numaraları..... | 64 |
| Tablo 5.3: THDV minimizasyonu temelli optimal FDÜB ve PF planlama yaklaşımına ait problemin senaryo 4 için çözümü sonucu elde edilen BK, $THDV_M$ ve VD değerleri..... | 65 |
| Tablo 5.4: THDV minimizasyon temelli optimal FDÜB ve PF planlama yaklaşımına ait problemin senaryo 5 için çözümü sonucu elde edilen FDÜB baraları ve güçleri..... | 68 |
| Tablo 5.5: THDV minimizasyon temelli optimal FDÜB ve PF planlama yaklaşımına ait problemin senaryo 5 için çözümü sonucu elde edilen PF baraları, temel frekans reaktif güçleri ve ayarlandıkları harmonik numaraları..... | 69 |
| Tablo 5.6: THDV minimizasyon temelli optimal FDÜB ve PF planlama yaklaşımına ait problemin senaryo 5 için çözümü sonucu elde edilen BK, $THDV_M$ ve VD değerleri..... | 69 |
| Tablo 5.7: Gerilim profilini ve FDÜB barındırma kapasitesini en iyileştirme temelli optimal FDÜB ve PF planlama yaklaşımına ait problemin senaryo 4 için çözümü sonucu elde edilen FDÜB baraları ve güçleri..... | 73 |
| Tablo 5.8: Gerilim profilini ve FDÜB barındırma kapasitesini en iyileştirme temelli optimal FDÜB ve PF planlama yaklaşımına ait problemin senaryo 4 için | |

| | |
|---|-----|
| çözümü sonucu elde edilen PF baraları, temel frekans reaktif güçleri ve ayarlandıkları harmonik numaraları. | 73 |
| Tablo 5.9: Gerilim profilini ve FDÜB barındırma kapasitesini en iyileştirme temelli optimal FDÜB ve PF planlama yaklaşımına ait problemin senaryo 4 için çözümü sonucu elde edilen BK, THDV _M , VD ve AF değerleri. | 74 |
| Tablo 5.10: Gerilim profilini ve FDÜB barındırma kapasitesini en iyileştirme temelli optimal FDÜB ve PF planlama yaklaşımına ait problemin senaryo 5 için çözümü sonucu elde edilen FDÜB baraları ve güçleri. | 77 |
| Tablo 5.11: Gerilim profilini ve FDÜB barındırma kapasitesini en iyileştirme temelli optimal FDÜB ve PF planlama yaklaşımına ait problemin senaryo 5 için çözümü sonucu elde edilen PF baraları, temel frekans reaktif güçleri ve ayarlandıkları harmonik numaraları. | 78 |
| Tablo 5.12: Gerilim profilini ve FDÜB barındırma kapasitesini en iyileştirme temelli optimal FDÜB ve PF planlama yaklaşımına ait problemin senaryo 5 için çözümü sonucu elde edilen BK, THDV _M , VD ve AF değerleri. | 78 |
| Tablo D.1: IEEE 33 baralı test sistemi hat verileri. | 120 |
| Tablo E.1: HÜY'ler için HAK modeli akım verileri. | 121 |
| Tablo E.2: HÜY'ler için NED modeli akım verileri. | 121 |
| Tablo E.3: HÜY'ler için NED modeli empedans verileri. | 122 |
| Tablo F.1: FDÜB'ler için HAK modeli akım verileri. | 122 |
| Tablo F.2: FDÜB'ler için NED modeli akım verileri. | 123 |
| Tablo F.3: FDÜB'ler için NED modeli empedans verileri. | 123 |

SEMBOL LİSTESİ

| | |
|------------------|---|
| \vec{A} | :Katsayı vektörü. |
| BK | :Sistemin FDÜB barındırma kapasitesi. |
| BN_{PFn} | :n. harmonik tek ayarlı PF'nin yerleştirildiği bara numarası. |
| \vec{C} | :Katsayı vektörü. |
| $\sum_m P_{FVm}$ | :Sisteme bağlı m tane FDÜB'ün toplam gücü. |
| $\sum_n Q_{PFn}$ | :Sisteme bağlı n tane PF'nin temel frekans toplam reaktif gücü. |
| h | :Harmonik numarası. |
| $Hata_{TDD}$ | :Toplam talep bozulma değeri hata indisi. |
| h_S | :Modelin oluşturulmasında dikkate alınan en yüksek harmonik numarası. |
| h_{tn} | :n. tek ayarlı tek ayarlı PF'nin ayarlandığı harmonik numarası. |
| $\bar{I}_{N,h}$ | :h. harmonik Norton akım kaynağının fazör değeri. |
| \bar{I}_k | :k'nci hat akım fazör değeri. |
| $IHDV_i$ | :Bara gerilimlerinin harmonik bileşenleri. |
| $iter_{max}$ | :Maksimum iterasyon sayısı. |
| N_{FV} | :Maksimum FDÜB sayısı. |
| N_{PF} | :Maksimum PF sayısı. |
| P_i | :i. bara aktif gücü. |
| P_{FVm} | :m. FDÜB'ün aktif güç değeri. |
| \bar{S}_i | :i. bara kompleks gücü. |
| S_{Li} | :i. baraya bağlı yükün temel frekans görünür gücü. |
| t | :İterasyon adımı. |
| TDD | :Toplam talep bozulma değeri. |
| $THDI$ | :Toplam akım harmonik bozulma değeri. |
| $THDV_i$ | :i. baraya ait toplam gerilim harmonik bozulma değerleri. |
| $THDV_M$ | :Baralarda gözlemlenen maksimum toplam gerilim harmonik bozulma değeri. |
| Q_{PFn} | :n. tek ayarlı PF'nin temel frekans reaktif gücü. |
| VD | :Bara temel harmonik toplam gerilim rms sapma değeri. |
| \bar{V}_i^h | :i. baraya ait h. harmonik geriliminin fazör değeri. |
| \bar{V}_j | :j'inci bara gerilim fazör değeri. |
| $V_{RMS,i}$ | :i'inci baraya ait gerilimin rms (etkin) değeri. |
| \bar{Y}_{kj} | :k'nci akım ve j'inci gerilim değeri tarafından bulunan admittans değeri. |
| X^* | :İçinde bulunan ana kadar elde edilen en iyi sonucun konum vektörü. |
| \vec{X} | :Konumu güncellenecek olan ajana ait konum vektörü. |
| $\bar{Z}_{N,h}$ | :h. harmonik Norton emdepansın fazör değeri. |

ÖNSÖZ

Bu tezde, fotovoltaik dağıtık üretim birimlerinin (FDÜB) yer aldığı sistemlerin harmonik analizleri için model ve algoritmaların performans analizlerinin gerçekleştirilmesi, standartlarda tanımlanan harmonik sınırlamalar aşılmadan FDÜB'lerin güç sistemlerine azami güç seviyesinde dahil edilmesi için optimal FDÜB ve pasif filtre (PF) planlama (boyutlandırma ve yerleştirme) algoritmasının geliştirilmesi üzerine çalışmalar yapılmıştır.

Tez kapsamında desteklenen çalışmalar neticesinde, uluslararası hakemli konferanslarda 1 bildiri yayımlanmış ve dergi parkta yer alan dergilerde 1 makale yayımlanmak için kabul edilmiştir. Ayrıca bu çalışmalara ilaveten, tez çıktılarının sunulduğu SCI indeksli hakemli dergilere kaydedilmek üzere 3 makale çalışması hazırlanmaktadır.

Yukarıda özetlenen tez kapsamında gerçekleştirilmiş çalışmalar “TÜBİTAK 1001” programı tarafından desteklenmiştir.

Bu tez çalışmanın gerçekleştirilmesinde desteklerini bir gün bile eksik etmeyen tez danışmanım Doç. Dr. Murat Erhan BALCI'ya, tezim hususundaengin bilgileri ışığında yardımlarını esirgemeyen Prof. Dr. M. Hakan HOCAOĞLU'na, Dr. Öğr. Üyesi S. Ahmet SİS'e, Dr. Öğr. Üyesi Tuba GÖZEL'e, Dr. Öğr. Üyesi Fuat KILIÇ'a ve deneysel çalışmalarını yapmamda yardımcı olan çalışma arkadaşlarım Onur ÖZTÜRK, M. Bekir ATSEVER ve Ahmet KÖKSOY'a derin sevgi ve saygılarımı sunarım.

Ayrıca benim bu süreçte sürekli yanımda bulunan sevgili ailem, Yunus KARADENİZ'e, Vecihe KARADENİZ'e, Tuğçe KARADENİZ'e, Saniye ALP'e, Mustafa ALP'e ve sevgili eşim Gözde ALP KARADENİZ'e en içten sevgilerimi sunarım.

Balıkesir, 2019

Alp KARADENİZ

1. GİRİŞ

Fotovoltaik (FV) hücreler, rüzgar türbinleri, biokütle, küçük hidro ve yakıt hücreleri temelli elektrik üreten dağıtık üretim birimleri (DÜB), gerilim profiline iyileştirilmesi, sistem güvenilirliğinin artırılması, hat kayıplarının azaltılması ve enerji verimliliğinin artırılması bakımından faydaları olması sebebiyle, günümüz dağıtım sistemlerinde yaygın şekilde yer almaya başlamıştır [1], [2]. Ayrıca, bu yenilenebilir enerji kaynaklı DÜB'lerin güç sistemlerinde yaygınlaşması, doğal gaz ve petrol gibi geleneksel enerji kaynaklarının kullanımına bağlı küresel ısınma ve iklim değişikliği gibi çevresel sorunları önlemek bakımından önemlidir. Yenilenebilir enerji kaynaklı DÜB'ler tarafından elektrik üretimi, geleneksel fosil enerji kaynaklarının kısıtlı olduğu ülkelerde meydana gelebilecek enerji krizlerini önlemek için de bir tedbirdir. Bu avantajların yanı sıra, yenilenebilir enerji kaynaklı elektrik üretim teknolojileri, fosil yakıt kaynaklı konvansiyonel elektrik üretim teknolojilerine kıyasla daha fazla gelişime açık olduğu için yenilenebilir enerji endüstrisi, yeni istihdam alanları oluşturma bakımından da avantajlıdır [3].

FV elektrik üretim birimleri günümüz dağıtım şebekelerinde en hızlı şekilde yaygınlaşan yenilenebilir enerji kaynaklı DÜB'lerden birisidir [4]. 2012-2017 yılları arası Dünya çapında yaklaşık olarak 300 GW kapasitesinde fotovoltaik enerji kaynaklı dağıtık üretim birimi (FDÜB) kurulmuştur. Böylece, 2017 yılında Dünya çapında kurulu FDÜB'lerin kapasitesi 400 GW'a yükselmiştir. FDÜB'lerin kapasitesinde son yıllarda gerçekleşen bu yükselişin sebepleri olarak, FV hücrelerin maliyetlerindeki düşüş, özellikle büyük güç seviyeleri için FV sistem elemanlarının imalatındaki teknolojik ilerleme, hükümetlerin teşvikleri ve FDÜB'lerin şebekeye bağlantısı üzerine yönetmeliklerin/ standartların olgunlaşması sıralanabilir [5], [6].

FDÜB'lerin buraya kadar özetlenen teknik, çevresel ve sosyolojik faydalarına karşın, boyutlandırılmaları ve şebekeye yerleştirilmeleri doğru yapılmadığı takdirde; elektrik güç sistemlerinde gerilim dalgalanmaları ve dengesizliği, ters güç akışına bağlı hat kayıplarındaki artışlar ile güç sistemlerinde koruma sorunları gibi çeşitli olumsuz etkileri meydana gelir [7]. Dolayısıyla, bu olumsuz etkilerin önlenmesi ve FDÜB'lerden azami fayda sağlanabilmesi için bu üretim birimlerinin optimal boyutlandırılması ve sisteme yerleştirilmesi üzerine çalışmalar literatürde önemini korumaktadır [2], [8]. Literatürde, optimal DÜB boyutlandırma ve yerleştirme probleminin çözümünde geleneksel olarak; (i)

hat kayıplarının minimizasyonu, (ii) gerilim regülasyonu ve kısa devre akımlarıyla ilgili indislerin en iyileştirilmesi ve (iii) DÜB'lerin toplam gücünün maksimizasyonu amaçlarının çeşitli kombinasyonları hedeflenmiştir. Bu geleneksel çalışmalarda, optimizasyon problemine dahil edilen kısıtlar ise; bara gerilim sınır değerleri, kısa devre akım sınır değerleri, DÜB kapasitesi ve istenilen güç faktörü aralığı şeklinde sıralanabilir [8].

Diğer taraftan, sinüzoidal olmayan (harmonik bozulmaya sahip) akım çeken güç elektroniği devreleri temelli doğrusal olmayan yüklerin günümüz güç sistemlerinde kullanımı artmıştır. Bu yüklerin artışı neticesinde güç sistemlerinde meydana gelen harmonik bozulmaya sahip hat akımları ve bara gerilimleri, enerji sağlayıcı ve tüketicilere ait elemanlarda kayıp artışları, aşırı ısınma ve ömür kaybı gibi olumsuz etkilere sebep olmaktadır. Bu olumsuz etkilerin azaltılması için güç sistemlerinde akım ve gerilim harmoniklerinin sınırlandırılmasına ilişkin IEEE 519 gibi uluslararası standartlar hazırlanmıştır [9]–[11].

Böylece, literatürdeki son çalışmalarda Fotovoltaik Enerji Santralleri ve Rüzgâr Enerji Santralleri tipi evirici vasıtasıyla güç sistemlerine bağlanan, dolayısıyla harmonik kaynağı olan DÜB'lerin optimal planlanmasında harmoniklerle alakalı sınırlamalar dikkate alınmaya başlanmıştır [7], [12], [13]. Bu çalışmalarda gerçekleştirilen analizler, genel olarak, evirici devreli DÜB'lerin gerilim harmonikleriyle etkileşimini dikkate almayan Harmonik Akım Kaynağı (HAK) modeli ve Harmonik Etkileşim Algoritması (HEA) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalardan [12], [13] de, iki baralı tipik bir dağıtım sistemi için pasif filtrelerin evirici devreli DÜB'lerin azami güç seviyesinde sisteme dahil edilmesi amacıyla pasif filtre boyutlandırma problemi çözülmüştür.

1.1 Tezin Amacı

Bu tez çalışmasında öncelikle, kurulan deneysel test sisteminde alınan ölçüm verileri kullanılarak,

- (i) FDÜB'lerin farklı harmonik bileşenlere ve THDV değerlerine sahip çok sayıda bağlantı noktası gerilimi altında ve farklı yüklenme seviyelerinde, akım harmonik bozulma değerlerinin istatistiksel analizinin yapılması,
- (ii) Aynı test durumları için literatürde yaygın olarak bilinen frekans tanım bölgesi harmonik üreten yük modellerinin, FDÜB'lerin enjekte ettiği akım harmoniklerinin hesabında hassasiyetlerinin, istatistiksel analizinin yapılması,

amaçlanmıştır.

Çalışmanın devamında ayrıca;

- (i) Sistemin gerilim profilinin ve FDÜB barındırma kapasitesinin en iyileştirilmesi amacıyla optimal FDÜB ve PF planlaması (boyutlandırılması ve yerleştirilmesi) için bir algoritma geliştirilmesi,
- (ii) IEEE 33 baralı test sistemi için geliştirilen algoritma ile optimal PF planlama çalışmalarında geleneksel olarak dikkate alınan amaç fonksiyonu olan THDV minimizasyonunu hedefleyen optimal PF ve FDÜB planlama algoritmasının sonuçlarının karşılaştırmalı analizinin yapılması,
- (iii) Bu karşılaştırmalı analizlerde algoritma-model çiftlerinin sonuca etkisinin de ele alınması,

amaçlanmıştır.

1.2 Tezin Sınırları

Tez içerisinde sunulan analizlerin sınırları şöyledir:

- Frekans tanım bölgesi modellerden literatürde yaygın olarak bilinen HAK, NED ve ÇFAM modelleri analizlerde dikkate alınmıştır.
- Frekans tanım bölgesi harmonik analiz yöntemlerinden literatürde yaygın olarak bilinen ve pratik bir şekilde uygulanabilen HEA ve THGA yöntemleri analizlerde dikkate alınmıştır.
- Optimal FDÜB ve PF planlama (boyutlandırma ve yerleştirilme) problemlerinin çözümünde balina optimizasyon algoritması (BO) kullanılmıştır.
- Optimal planlama analizlerinde harmonik iyileştirme için tek ayarlı PF kullanılmıştır.
- Optimal FDÜB ve PF planlama yaklaşımlarının test edilmesinde IEEE 33 baralı test sistemi dikkate alınmıştır. Test sisteminde gerilim ve akımlar dengeli kabul edilmiştir.
- Yapılan optimal planlama analizlerinde IEEE Standart 519'da tanımlı harmonik sınırlamalar dikkate alınmıştır.

1.3 Tezin İçeriği

Bu tez çalışması kapsamında ilk olarak ilgili literatür taraması yapılmış olup elde edilen çıktılar tezin ikinci bۆlümünde ۆzetlenmiřtir.

İkinci olarak, tezin amaçları doğrultusunda, programlanabilir gerilim kaynağı, yk ve evirici devreli dağıtık ۆretim birimi (fotovoltaik dağıtık ۆretim birimi: FDÜB) barındıran kk bir test sistemi kurulmuştur. Bu test sisteminde, çeşitli yüklenme oranlarında, farklı toplam harmonik bozulma (THDV) seviyelerine ve harmonik bileşenlere sahip çok sayıda bağlantı noktası gerilimleri altında FDÜB akımları ۆlmřtir. ۆlm verilerinin bir kısmıyla test edilen FDÜB için harmonik akım kaynağı (HAK), Norton eşdeğer devre (NED) ve çapraz frekans admittans matris (FAM) modelleri oluşturulmuştur. Geri kalan ۆlm verileri referans alınarak, modellerin FDÜB'e ait harmonik akımlarının hesabındaki hataları istatistiksel olarak analiz edilmiştir. Ayrıca, bu sistemde yapılan ۆlmler dikkate alınarak, FDÜB'lerin çeşitli yüklenme oranlarında, farklı THDV seviyelerine ve harmonik bileşenlere sahip çok sayıda bağlantı noktası gerilimleri altında akım harmoniklerinin davranışı incelenmiştir. Bu alışmalar tezin ۆnc bۆlümünde verilmiştir.

Daha sonra, sırasıyla en pratik ve en hassas modeller olan HAK ve NED modelleri, harmonik etkileşim analizi (HEA) ve tam harmonik güç akışı (THGA) algoritmalarına entegre edilerek, IEEE 33 baralı test sistemi için HEA-HAK, HEA-NED, THGA-HAK ve THGA-NED algoritma-model çiftlerinin MATLAB kodları hazırlanmıştır. FDÜB'lerin yanı sıra doğrusal ve doğrusal olmayan yüklerin de bulunduğu aynı sistem için, bu dۆrt farklı algoritma-model çiftinin sonuçları ve hızları karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Bu alışmalar tezin dۆrdnc bۆlümünde verilmiştir.

Son olarak, IEEE 33 baralı test sisteminde, optimal FDÜB ve pasif filtre (PF) planlama (boyutlandırma ve yerleştirme) probleminin çözümü için literatürde henüz ۆnerilen balina optimizasyon (BO) algoritması uygulanmıştır. Boyutlandırma ve yerleştirme algoritması için amaç fonksiyonu olarak; baralara ait en yüksek THDV değerinin minimizasyonu, bara gerilimlerinin rms sapma değerinin minimizasyonu ve sistemin FDÜB barındırma kapasitesinin maksimizasyonu seçilmiştir. Geliştirilen yaklaşımda kısıt olarak; geleneksel FDÜB planlama kısıtları ile IEEE 519 standardında tanımlı gerilim harmonik sınırlamaları dikkate alınmıştır. Ayrıca, optimal PF planlama çalışmalarının gelenekselleşmiş bir amacı olan THDV minimizasyonu, optimal FDÜB ve PF planlama probleminin çözümünde amaç

fonksiyonu olarak dikkate alınmıştır. Böylece aynı kısıtlar için her iki yaklaşımın sonuçları karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Yapılan çalışmalarda, ayrıca; HEA-HAK, HEA-NED, THGA-HAK ve THGA-NED algoritma-model çiftlerinin, her iki yaklaşımın sonuçlarına etkileri incelenmiştir.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Bu bölümde sunulan literatür taraması;

- Fotovoltaik dağıtık üretim birimlerinin (FDÜB) tanıtımı,
- Bu birimlerin şebekeye olumsuz etkileri ve bağlantı standartları,
- Pasif harmonik filtreler,
- FDÜB'ler için frekans tanım bölgesi harmonik modelleri ve analiz algoritmaları
- İle güç sistemlerinin harmonik kısıtlı dağıtık üretim birimi barındırma kapasitesinin belirlenmesi ve iyileştirilmesi üzerine yapılan çalışmalar,

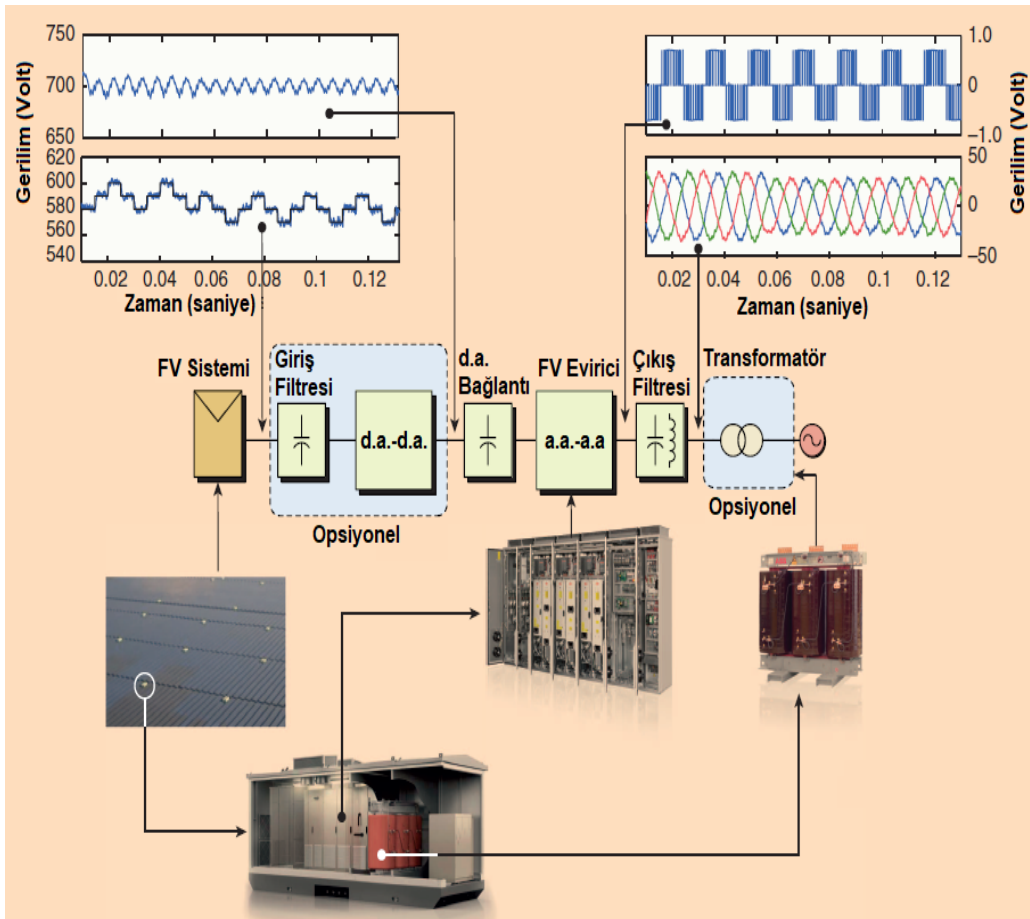
üzerine yoğunlaşmıştır.

2.1 Fotovoltaik Dağıtık Üretim Birimleri

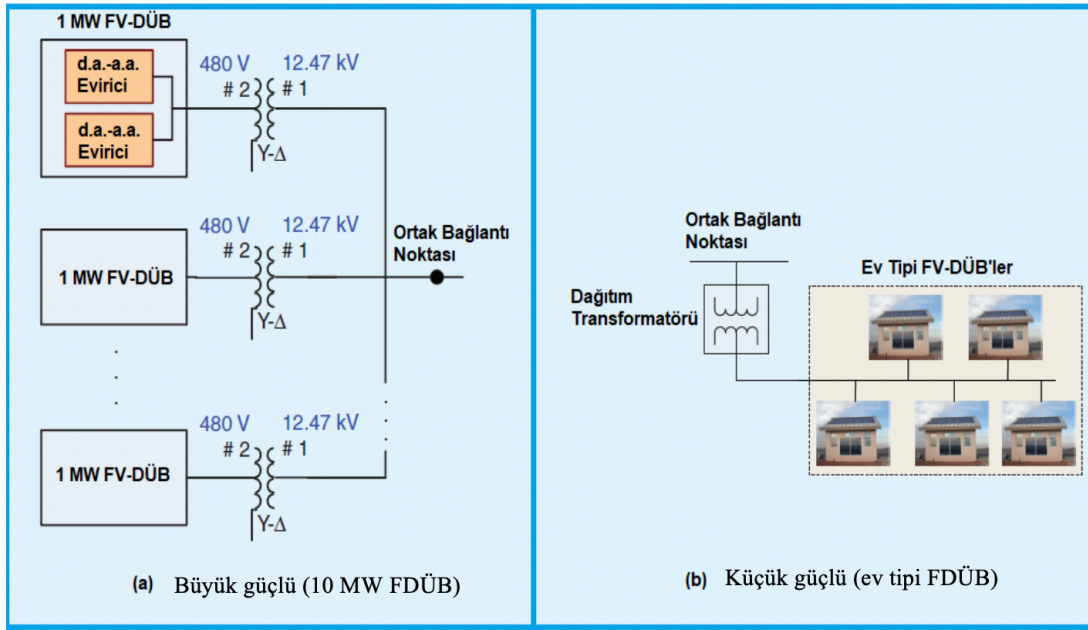
Fotovoltaik (FV) elektrik üretim birimleri, şebekeye bağlı olmayan ve şebekeye bağlı olan başlıkları altında iki ana sınıfa ayrılabilirler. Şebekeye bağlı olmayanlar, elektrik dağıtım sisteminin ulaşmadığı yerlerdeki tüketicilerin beslenmesi için tek başına veya diğer enerji kaynaklarıyla (rüzgâr türbinleri, dizel generatörler ve yakıt pilleri gibi kaynaklarla) birlikte kullanılan sistemlerdir. Şebekeye bağlı olanlar ise ürettikleri enerjiyi elektrik dağıtım şebekelerine verebilen sistemlerdir [7]. Avrupa'da kurulu olan FV elektrik üretim birimlerinin yaklaşık %98.7'si şebeke bağlı tipte ve %1.3'ü ise şebekeye bağlı olmayan tiptedir [14].

Tipik bir FDÜB'ün yapısı Şekil 2.1'de verilmiştir. Bu yapıda, FV paneller, doğru akım-doğru akım (d.a.-d.a.) dönüştürücü devresi, doğru akım-alternatif akım (d.a.-a.a.) dönüştürücü devresi, pasif filtre ve bağlantı transformatörü bulunabilir. Ayrıca, FDÜB'lerde, FV panellerin çıkışındaki d.a. gerilimin, d.a.-a.a. dönüştürücü devresinin (eviricinin) giriş gerilim seviyesine ayarlanması amacıyla opsiyonel olarak; d.a.-d.a. dönüştürücü kullanılmaktadır. d.a.-d.a. dönüştürücü çıkışındaki d.a. elektrik enerjisinin a.a. elektrik enerjisine dönüştürülmesi ise eviricilerle gerçekleştirilmektedir. Diğer taraftan, evirici çıkışındaki bozuk gerilim dalga şeklinin düzeltilmesi için pasif filtre, şebekeye senkronizasyon ve gerilim-akım-güç gibi çeşitli elektriksel büyüklüklerin ölçümü için şebeke izleme birimi ve evirici çıkışındaki gerilimi şebeke gerilimine yükseltecek bir transformatör bulunur. Transformatörün sistemde kullanımı, şebeke gerilim seviyesine, evirici topolojisine ve evirici kontrol yöntemine bağlıdır [15].

Şebekeye bağlı FDÜB'ler güçlerine göre büyük kapasiteli (FV enerji santralleri: 1-10MW güçlerde), orta kapasiteli (10-1000 kW güçlerde) ve küçük kapasiteli (10 kW'a kadar güçlerde) FV sistemler olmak üzere üç sınıfa ayrılabilir [4]. Büyük ve küçük kapasiteli FDÜB'lere ait bağlantı şemaları Şekil 2.2'de verilmiştir. Büyük kapasiteli FDÜB'ler üç fazlı sistemlerdir ve tipik olarak bir veya daha fazla dağıtım transformatörü üzerinden şebekeye bağlanırlar. Bu sistemler ayrıca çok sayıda birbirine paralel bağlı evirici modüllerine sahiptirler. Orta ölçeklilerin şebekeye bağlantı şekli güçlerine göre değişkenlik gösterir. Yüzlerce kW gücündeki orta ölçekli FDÜB'ler, büyük ölçekliler gibi ayrı bir dağıtım transformatörü üzerinden şebekeye bağlanır. Diğer taraftan, düşük güçlü orta ölçekli FDÜB'ler müşteriye ait bir transformatör üzerinden şebekeye bağlanabilir. Bununla birlikte şu belirtilmelidir ki; küçük kapasiteli FDÜB'ler tipik olarak herhangi bir bağlantı transformatörüne ihtiyaç duymazlar ve tek fazlıdırlar.



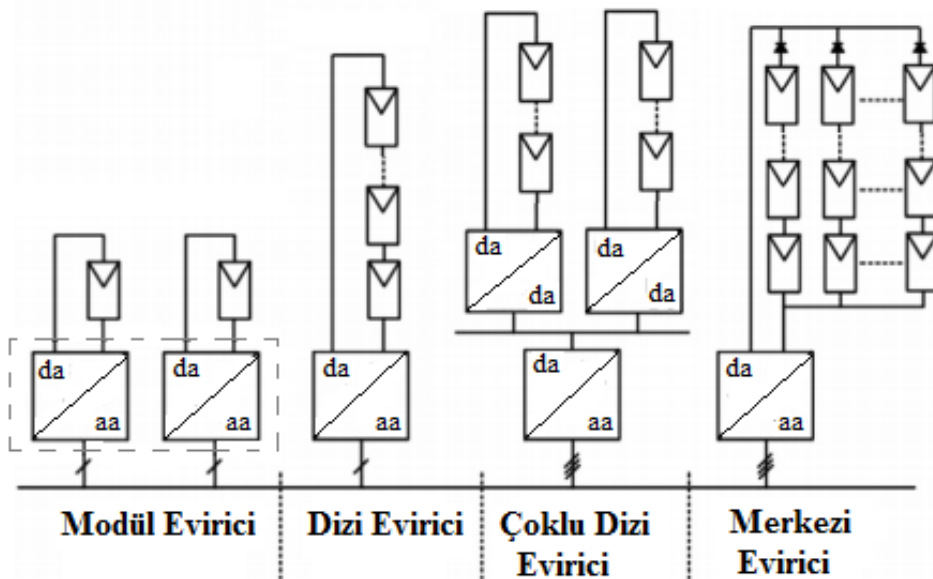
Şekil 2.1: Tipik bir FDÜB'ün yapısı [15].



Şekil 2.2: (a) Büyük güçlü FDÜB'ler, (b) küçük güçlü FDÜB'ler [4].

2.1.1 FDÜB'ler İçin Evirici Bağlantı Konfigürasyonları

FDÜB'ler evirici bağlantı konfigürasyonlarına göre; modül eviricili, dizi eviricili, çoklu dizi eviricili ve merkezi eviricili olmak üzere dört farklı tipe sınıflandırılabilirler. Bu konfigürasyonların şematikleri Şekil 2.3'de sunulmuştur.



Şekil 2.3: Evirici konfigürasyonları.

Merkezi eviricili konfigürasyonda, istenilen gerilim ve güç seviyesine ulaşmak için gerekli olan çok sayıda FV modül, ortak bir evirici üzerinden şebekeye bağlanır. 10-250 kW güç aralığında değişen güç değerlerinde tasarlanabilen bu konfigürasyon santrallerde kullanılmaktadır. Diğer taraftan, merkezi eviricili konfigürasyonun bazı önemli dezavantajları vardır. Bunlar; evirici ile modüller arası bağlantı için yüksek gerilim d.a. kablolarının gerekli olması, merkezi azami güç noktası takip (AGNT) sistemi kaynaklı kayıplar, FV modülleri arası uyumsuzluk kaynaklı kayıplar ve FV dizilerinde bulunan diyotlarda meydana gelen kayıplardır.

Dizi eviricili konfigürasyon, merkezi eviricili konfigürasyonun küçültülmüş versiyonudur. Bu versiyonda seri bağlı bir dizi FV modül eviriciye bağlıdır ve bu eviriciler 1 ile 8 kW arası güç değerlerinde üretilmektedir. Ayrıca, AGNT sistemi tek bir diziyi kontrol ettiği için verim, merkezi eviricili konfigürasyona göre daha yüksektir.

Çoklu dizi eviricili konfigürasyonda, her bir FV modül dizisi kendi d.a.-d.a. dönüştürücüsü üzerinden ortak eviriciye bağlanır. Bu konfigürasyonda, her bir dizinin AGNT sistemi ayrıdır; böylece her dizi ayrı ayrı kontrol edilebilir durumdadır. Çoklu dizi evirici konfigürasyon, dizi ve merkezi eviricili konfigürasyonların avantajlarına sahiptir; kompakt ve maliyet açısından verimlidir, 8 ile 20 kW aralığında güç değerleri için uygulanmaktadır.

Modül evirici konfigürasyonunda, sadece bir FV modül ile bir evirici bağlıdır. Böylece, FV modüller arası uyumsuzluk gibi bir sorunla karşılaşılmaz, ayrıca FV modül ile evirici arasında optimal çalışma durumu sağlanmış olur. Modül eviricili konfigürasyon günümüzde 150 ile 600 W güç aralığında üretilmektedir, ancak modül sayısı artırılarak pratik bir şekilde güç değeri yükseltilebilir. Diğer taraftan, tek bir FV modülün eviriciye bağlı olması, gerilimin yükseltilmesi ihtiyacını doğurmaktadır. Dolayısıyla, bu konfigürasyonda evirici d.a.-d.a. dönüştürme devresi içermek zorundadır. Modül evirici konfigürasyonun, aynı güç değeri için diğer konfigürasyonlara kıyasla yüksek maliyetli olması, bu konfigürasyonun dezavantajıdır.

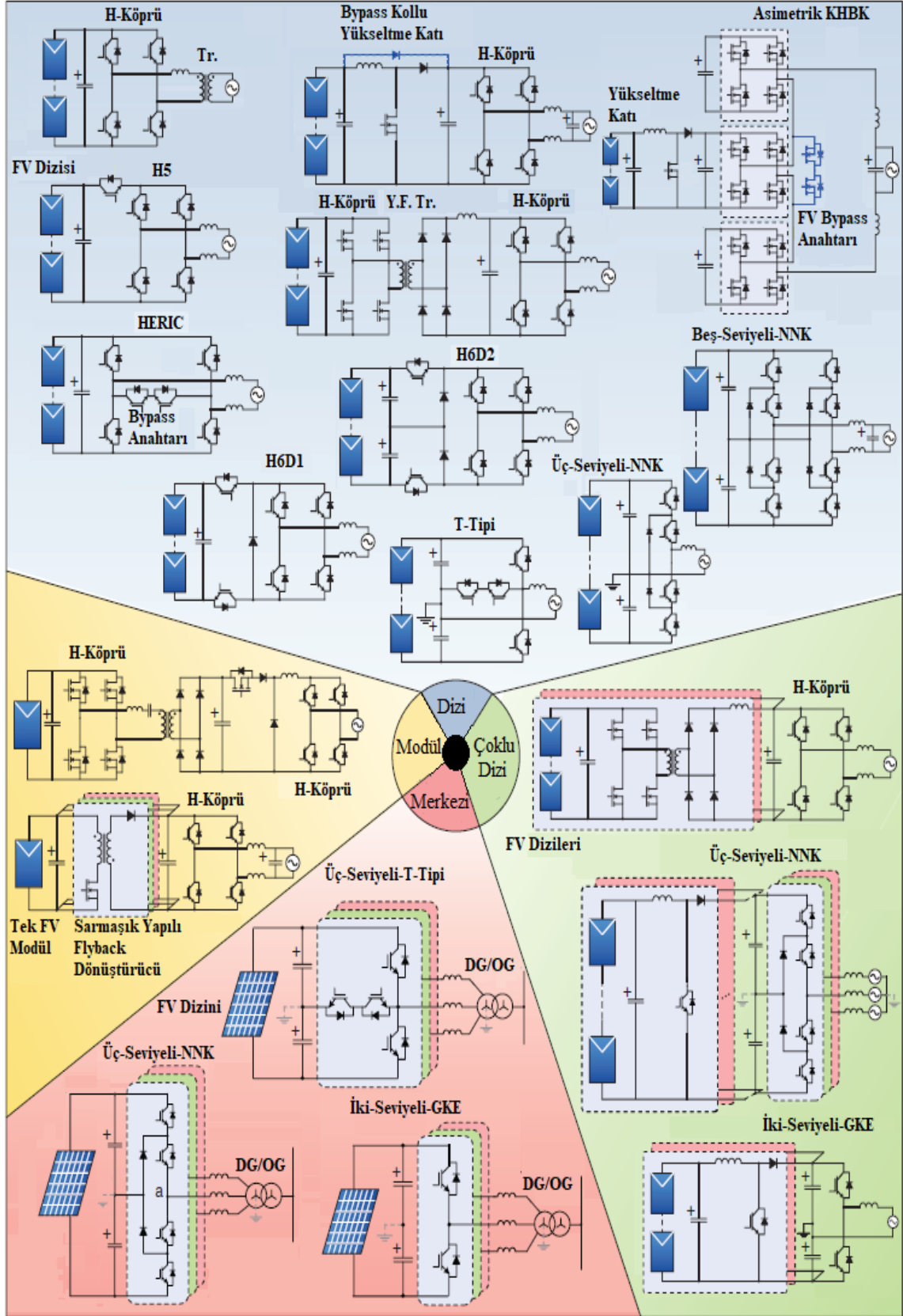
Yukarıda kısaca tanıtilen dört farklı konfigürasyon, verim ve performans bakımından karşılaştırıldığında kötünden iyiye; merkezi evirici, çoklu dizi evirici, dizi evirici ve modül evirici konfigürasyonlar olarak sıralanabilir [14], [16], [17].

2.1.2 Evirici Devre Topolojileri

Modül, dizi, çoklu dizi ve merkezi FV sistem konfigürasyonlarında kullanılan ticarileşmiş çeşitli evirici devre topolojilerinin şematikleri Şekil 2.4’de verilmiştir [15]. Bu şekilden, dizi FV konfigürasyonu için transformatör (Tr.) üzerinden şebekeye bağlanan H-köprü, transformatörsüz H-köprü, yüksek frekans transformatörlü (Y.F. Tr.) H-köprü, H5, HERIC, H6D1, H6D2, T-tipi, üç-seviyeli-nötr noktası kilitlemeli (NNK), beş-seviyeli-NNK ve asimetrik kaskat bağlı H-köprü (KBHK) topolojilerinin olduğu görülmektedir.

Aynı şekil, çoklu dizi FV konfigürasyonu için H-köprü, üç-seviyeli-NNK ve iki-seviyeli-gerilim kaynağı evirici (GKE) topolojilerinin, merkezi FV konfigürasyonu için üç-seviyeli-T-tipi, üç-seviyeli-NNK ve iki-seviyeli-GKE topolojilerinin, modül FV konfigürasyonu için Y.F. Tr.li H-köprü ve sarmaşık yapıllı flyback dönüştürücülü H-köprü topolojilerinin varlığını göstermektedir. Burada şu belirtilmelidir ki; dizi FV konfigürasyonu için kullanılan bütün topolojiler çoklu dizi konfigürasyonu için de kullanılabilir olduğundan, bu topolojiler Şekil 2.4’de ayrıca çoklu dizi FV konfigürasyonu için tekrar sunulmamıştır.

Evirici topolojileri incelendiğinde, topolojilerin transformatörlü ve transformatörsüz olmak üzere iki ana başlık altında toplanabileceği görülmektedir [15]. Evirici çıkışındaki a.a. gerilimi şebeke gerilim seviyesine yükseltmek için kullanılan bağlantı transformatörleri, galvanik izolasyona sahip oldukları için dağıtım transformatörlerinde doymaya sebep olan d.a. akımların şebekeye akışını engeller. Ancak, bağlantı transformatörü kullanımı eviricinin boyutunu büyütmede, maliyeti arttırmakta ve verimi düşürmektedir. Bu sebeple birçok yeni evirici topolojisinde gerilim yükseltme işlemi, yüksek frekans transformatörleriyle veya d.a.-d.a. dönüştürücülerle gerçekleştirilmektedir. Yüksek frekans transformatörlü topolojilerde, FV kaynak çıkışındaki d.a. gerilim, bir H-köprü eviriciyle yüksek frekanslı a.a. gerilime dönüştürülür, bu gerilimin seviyesi daha sonra transformatörle yükseltilir ve bir köprü doğrultucuyla doğrultularak şebeke frekansında a.a. gerilim veren ikinci H-köprü eviriciye iletilir [15].



Şekil 2.4: FV sistemler için evirici topolojileri [15].

Yüksek frekanslı transformatörler şebeke ile FV panel arası galvanik izolasyonu sağlamakla birlikte, d.a. akımın şebekeye akışı problemini ortadan kaldırmaz. Diğer taraftan, transformatörsüz evirici tiplerinde, FV panel ve şebeke arası yüksek kaçak akımları önlemek için; (i) özel modülasyon teknikleriyle ortak mod gerilim ayarı, (ii) bypass anahtarlarının kullanımı ve (iii) d.a. bağlantı ortak noktası ile şebeke nötr noktasının aynı yere topraklanması gibi yöntemler tercih edilmektedir [15].

2.2 FDÜB'lerin Şebekeye Olumsuz Etkileri ve Bağlantı Standartları

Son yıllarda, FDÜB'lerin sayılarında ve kapasitelerinde önemli derecede artış meydana gelmiştir [5], [18]. Bu dağıtık üretim birimleri, geleneksel elektrik üretim birimlerinden farklı olarak; kısmen tahmin edilebilir ve kesintili üretim karakteristiğine sahip olmaları ve güç elektroniği devreleri üzerinden şebekeye bağlanmaları sebebiyle güç kalitesi, kararlılık ve güvenilirlik sorunlarına yol açmaktadırlar. Bu sorunları önlemek amacıyla ülkelerin ilgili kuruluşları ve çeşitli uluslararası organizasyonlar tarafından, FDÜB'lerin elektrik güç sistemlerine bağlantısı için gereksinimler tanımlayan birçok standart hazırlanmıştır [6], [16], [17].

Uluslararası düzeydeki standartlardan yaygın olarak tanınan ve kullanılanları; “Dağıtık kaynakların elektrik güç sistemlerine bağlantısı için IEEE standardı” başlıklı IEEE Std 1547-2003, IEEE Std 1547a-2014 ve “FV sistemleri-şebeke arabirimi karakteristikleri” başlıklı IEC 61727-2004 standartlarıdır [19]. IEEE 1547 standardı, anma gücü 10 MVA'nın altındaki DÜB'lerin şebekeye bağlantısı için teknik gereklilikler ve test yöntemleri ortaya koymuştur. IEC 61727 standardı ise anma gücü 10 kVA altındaki FDÜB'lerin alçak gerilim dağıtım sistemlerine bağlantısı üzerine gereksinimleri tanımlayan standarttır. Bir diğer önemli uluslararası standart ise “FV sistemlerin şebekeye bağlantı arabirimleri için tavsiye edilen uygulamalar” başlıklı IEEE 929 standardıdır [19]. Bu standart, dağıtım sistemine bağlı, anma gücü 10 kW altında olan küçük FV sistemler için bir pratik uygulama kılavuzu sunmuştur. Bu kılavuz, can güvenliği, sistem koruma, güç kalitesi ve şebekenin işletilmesiyle alakalı hususları kapsamaktadır.

FDÜB'lerin sebep olduğu güç kalitesi problemlerinden önde gelenleri; gerilim dalgalanmaları, gerilim yükselmesi ve harmonik bozulmaya sahip akımların şebekeye enjekte edilmesidir [7], [20], [21]. Aşağıda, tez kapsamı dikkate alınarak, bu güç kalitesi problemlerinden gerilim dalgalanmaları/yükselmesi ve harmonikler hakkında bilgi verilip

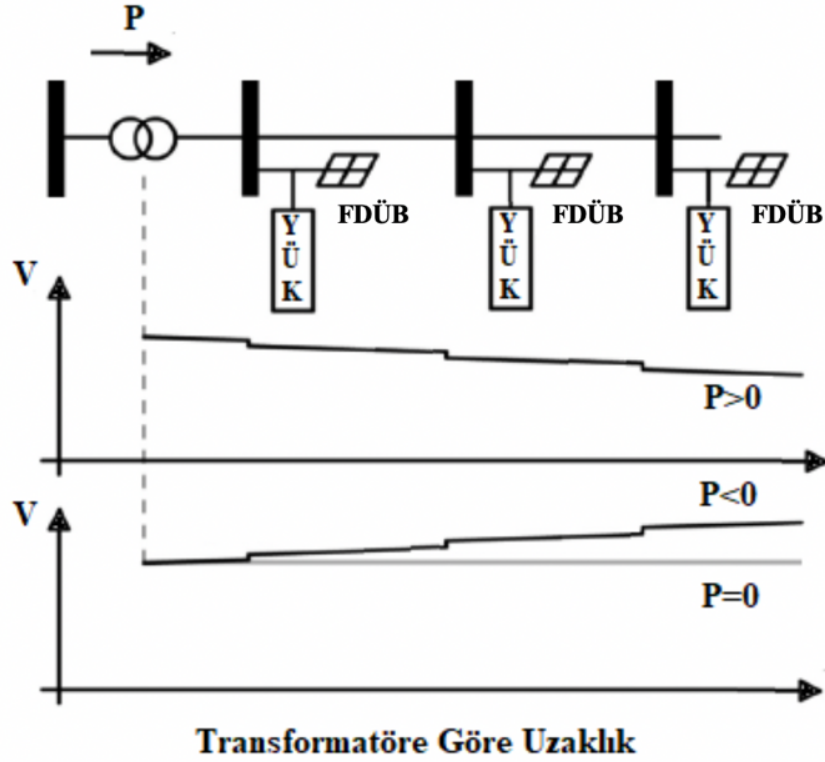
IEEE 1547, IEC 61727 ve IEEE 929 uluslararası standartlarının bunların önlenmesi için getirdiği sınırlamalar tanıtılacaktır.

2.2.1 Gerilim Dalgalanmaları ve Yükselmeleri

FDÜB'lere bağlı meydana gelen gerilim dalgalanma probleminin ana sebebi, bulutlanma ve açık hava gibi atmosferik olaylar neticesinde Güneş enerjisinin kesintili karakterde olmasına (Güneş enerjisinin emre amade olmamasına) bağlı olarak, FDÜB'lerin çıkış gücünde meydana gelen dalgalanmalar olarak ifade edilebilir [7], [20], [21].

Diğer taraftan, dağıtım sistemlerinde hat kayıplarını minimize etmek ve gerilim profilini iyileştirmek için FDÜB'ler tüketicilere yakın noktalara bağlanır ve bu tüketicileri besleyecek güçte boyutlandırılırlar. Ancak, FDÜB'ün ürettiği güç değeri tüketilen güçten büyük olduğu takdirde, FDÜB yükü beslemenin yanı sıra hattı besler. Böylece, yük tarafından hatta doğru ters güç akışı meydana gelir ve yük barasındaki gerilim değeri yükselir [7], [20], [21]. Şekil 2.5'de verilen şematik ve grafiklerle, güç akış yönünün gerilim seviyesine etkisi gösterilmiştir. Ayrıca, ters güç akışı, dağıtım hattında meydana gelen kısa devre arıza durumunda, arızanın hem şebeke hem de FDÜB tarafından beslenmesine ve arıza akımının büyümesine de yol açar [7].

IEEE 1547 ve IEC 61727 standartlarında, FDÜB'ler için şebeke geriliminin düzenlenmesinde bir sorumluluk tanımlanmamıştır. Ancak, bu üretim birimleri şebekeye bağlandığı durumda, sistem gerilimi tanımlanan sınırları aşmamalıdır. Diğer taraftan, IEEE 1547 standardı, FDÜB'lerin, reaktif güç ayarıyla sistem gerilimini düzenleme işlemine desteğini gerekli görmektedir.



Şekil 2.5: FDÜB'lerin bulunduğu sistemlerde gerilim seviyesinin güç akışının yönüne bağlı değişimi [7].

2.2.2 Harmonik Bozulmaya Sahip Akımlar

FDÜB'lerin yapısında bulunan evirici devrelerinin, şebekeye enjekte ettiği akımlar sinüzoidal olmayan (harmonik bileşenler içeren) dalga formuna sahiptir [7], [20]. Gerilim ve akım harmonik bozulması, generatörler, transformatörler, asenkron motorlar ve kompanzasyon kondansatörlerinde kayıp artışına, aşırı ısınma ve ömür kayıplarına, asenkron motorlarda güç faktörünün düşmesine ve moment dalgalanmalarına, ölçme, koruma ve kontrol sistemlerinin hatalı çalışmasına yol açan önemli bir güç kalitesi problemi [9], [10]. FDÜB'lerin akım harmonik bozulma karakteristiğini analiz eden birçok çalışma literatürde mevcuttur [22]–[24]. Bu çalışmalarda, FDÜB'lerin şebekeye enjekte ettiği harmonik akımlarının temel frekans akımına oranının, Güneş ışınımıyla ters orantılı ilişkiye sahip olduğu, bir başka ifadeyle FDÜB'lerin düşük Güneş ışınımı değerlerinde daha fazla bozulmuş akımlara sahip oldukları sonucuna varılmıştır.

FDÜB'ler için harmonik sınırlamalar bakımından yaygın olarak dikkate alınan standartlar, IEEE 1547 ve IEC 61727 standartlarıdır [6]. Bu standartların yanı sıra, ortak bağlantı noktası

için harmonik sınır değerleri tanımlayan IEEE Standart 519, FDÜB'lerin harmonik kirlilik seviyesi dikkate alınarak güç sistemlerine entegrasyonu üzerine yapılmış bazı çalışmalarda [13], [25]–[28] dikkate alınmıştır. Bu üç standart tanımladıkları harmonik sınırlamalar bakımından karşılaştırıldığında, IEEE 1547 ve IEC 61727 standartlarının birbirine çok yakın olduğu [6], diğer taraftan bu iki standardın IEEE 519 standardına göre daha sıkı olduğu ifade edilebilir [26].

2.3 Pasif Harmonik Filtreler

Harmonik bozulmanın azaltılması için pasif ve aktif filtreler yaygın olarak kullanılan güç sistem elemanlarıdır [29]. Pasif filtreler bobin, kondansatör ve direnç elemanlarından oluşan belli bir frekans veya frekans aralığına giren harmonik akımlarını süzen devrelerdir.

Aktif filtreler ise her bir harmonik numarası için gerilim veya akım kaynağı gibi davranan anlık güç teorisi temelli kontrol edilen güç elektroniği devreleridir. Aktif filtreler harmonik bozulma ve reaktif güç kompanzasyonunun iyileştirilmesi bakımından pasif filtrelere göre çok daha iyi performansa sahiptir. Ayrıca, pasif filtrelerin sistemde rezonans olaylarına dolayısıyla aşırı gerilim veya aşırı akımlara yol açma ihtimali aktif filtrelere göre bir dezavantajdır. Bununla birlikte, pasif filtreler düşük yüklenme durumlarında aşırı kompanzasyona yol açabilirler. Bütün bu dezavantajlara rağmen, aktif filtrelerin özellikle yüksek güçlü uygulamalarda yüksek maliyette olması sebebiyle pasif filtreler günümüzde halen yaygın olarak kullanılmaktadır [29]–[31].

Pasif filtrelerin, seri veya paralel tipleri mevcuttur. Seri tipleri harmonik üreten yükler ile şebeke bağlantı noktası arasına bağlı olup süzülme istenen harmoniklere yüksek empedans gösterecek şekilde tasarlanırlar ve bu harmonik akımlarının hattan akışını engellerler. Paralel pasif filtreler ise şebeke bağlantı noktası ile toprak arasına bağlanırlar ve süzülme istenen harmoniklere düşük empedans gösterirler. Böylece yüke ait harmonik akımları şebeke tarafına akmak yerine filtre üzerinden toprağa akarlar. Paralel pasif filtreler harmonik süzme özelliklerinin yanı sıra reaktif güç kompanzasyonu yetenekleri de olduğu için seri pasif filtrelere göre pratikte daha fazla tercih edilmektedirler. Paralel pasif filtrelerin tek ayarlı, iki ayarlı, üç ayarlı, sönümlü iki ayarlı, C tipi ve yüksek geçiren olmak üzere çeşitli tipleri vardır [29], [30], [31].

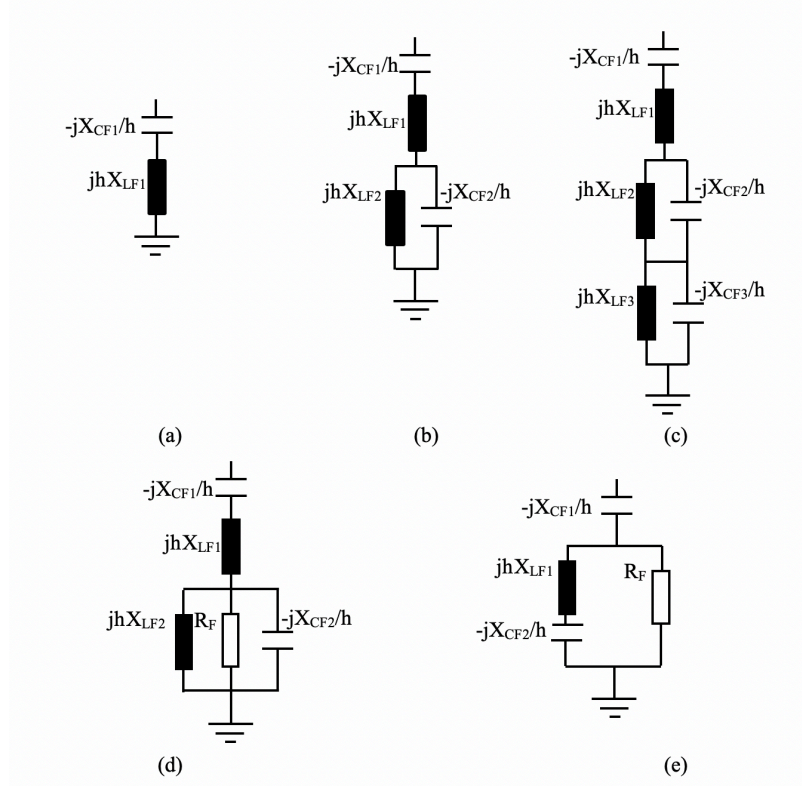
Ayarlı paralel pasif filtreler; ayar sayısına göre bir, iki veya üç harmonik numarasında düşük empedans gösterecek şekilde tasarlanır. Yüksek geçiren filtreler yüksek frekanslarda düşük empedans gösterirler. C tipi filtreler ise; temel frekansta basit bir kondansatör, ayarlandıkları frekansta tek ayarlı bir filtre ve yüksek frekanslarda yüksek geçiren filtre gibi davranırlar.

Şekil 2.6'da tek ayarlı, iki ayarlı, üç ayarlı, sönümlü iki ayarlı ve C tipi filtrelerin tek faz eşdeğer devreleri verilmiştir. Bu eşdeğer devrelere ait her bir harmonik numarası için empedans genliği karakteristikleri ise Şekil 2.7'den görülmektedir. Bu şekilde, filtrelere ait empedans değerleri, h. harmonik empedans genliğinin temel harmonik empedans genliğine oranı (Z_{Fh}/Z_{F1}) olarak verilmiştir.

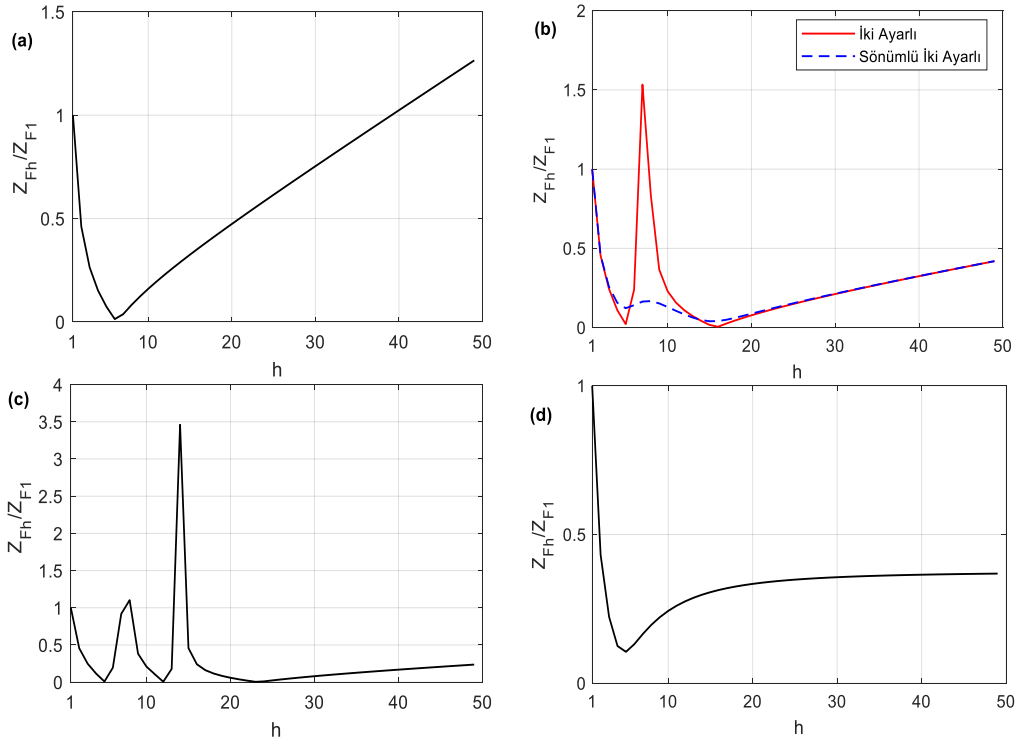
Literatürde, pasif filtre parametrelerinden, akım toplam harmonik bozulma, gerilim toplam harmonik bozulma, güç faktörü, filtre kaybı ve filtre maliyeti büyüklüklerinin birbirine göre zıt şekilde etkilenebildiği belirtilmiş, dolayısıyla bu büyüklüklerin çeşitli kombinasyonlarının en iyileştirilmesini amaçlayan farklı optimal pasif filtre tasarımları önerilmiştir [32]–[43].

Bu büyüklüklerin yanı sıra, bazı yeni tarihli çalışmalarda [31], [35], [44], transformatör ve kabloların harmonik bozulmaya sahip yük akımları altında azami yüklenme kapasitesinin maksimizasyonu için optimal pasif filtre tasarımları sunulmuştur. Bu optimal pasif filtre tasarım çalışmalarında, kısıt olarak; istenilen reaktif güç kompanzasyon veya güç faktörü aralığı ile standartlarda tanımlı gerilim ve akım harmonik sınırlamaları dikkate alınmıştır.

Optimizasyon teknikleri bakımından incelendiğinde, harmonik filtre tasarım çalışmaları, klasik doğrusal ve doğrusal olmayan programlama, sıralı ikinci dereceden programlama ve üst sezgisel (meta-heuristik) yöntem kategorilerine ayrılabilir. Optimal pasif filtre tasarım probleminde uygulanan üst sezgisel yöntemler arasında; genetik, parçacık sürü optimizasyon, benzetilmiş tavlama, diferansiyel gelişim, karınca kolonisi, karga arama ve balina optimizasyon algoritmaları sayılabilir [45].



Şekil 2.6: (a) Tek ayarlı, (b) iki ayarlı, (c) üç ayarlı, (d) sönümlü iki ayarlı ve (e) C tipi paralel pasif filtrelerin tek faz eşdeğer devreleri.



Şekil 2.7: (a) Tek ayarlı, (b) iki ayarlı ve sönümlü iki ayarlı, (c) üç ayarlı ve (d) C tipi pasif filtrelerin empedans karakteristikleri.

2.4 Harmonik Yük Akışı Analizi

Sistemde bilinmeyen gerilim ve/veya güç değerlerinin belirli kısıtlamalar altında bulunmasına yönelik metotlar, literatürde geleneksel yük akışı analizi metotları olarak adlandırılmaktadır. Bu algoritmaların temeli, bir baraya enjekte edilen kompleks güçler ile baradan çekilen kompleks güçler arasındaki farktan kaynaklanan güç hatasının ihmal edilebilecek kadar küçük seçilmiş tolerans değerinin altına indirilmesi esasına dayanır [46]. Diğer taraftan, harmonik bozulmanın bulunduğu güç sistemlerinde, temel harmonik bara gerilimi ve çekilen güç değerleri dışında ayrıca akım ve gerilimdeki harmonik bozulma değerleri hakkında bilgi veren harmonik güç akışı algoritmaları literatürde mevcuttur [9], [47], [48].

FDÜB'lerin harmonik analizi için literatürde frekans [13], [28], [49]–[51] ve zaman tanım bölgelerinde [6], [43], [52]–[57] çeşitli yöntemler uygulanmaktadır. Zaman tanım bölgesi yöntemlerinde, yaygın olarak, dinamik durum denklemlerinin çözümüne dayanan geçici hal analiz yazılımları/modelleri [43], [52]–[56] ve transfer fonksiyonu temelli modeller [57] kullanılmaktadır. Zaman tanım bölgesi analiz algoritmaları, frekans tanım bölgesi analiz algoritmalarına nazaran hassasiyetleri daha yüksek olmasına rağmen daha fazla hesap yüküne sahiptirler ve daha uzun çözüm sürelerine ihtiyaç duyarlar [48], [58]. Bundan dolayı, literatürde harmonik analizleri için genellikle frekans tanım bölgesi algoritmalar tercih edilmiştir. Diğer taraftan, her iki yöntemin avantajlarını bünyesinde barındıran hibrit analiz yöntemleri literatürde önerilmiştir [58]. Hibrit analiz yöntemlerinde, FDÜB'lerin akımları zaman tanım bölgesinde modellerle elde edilirken, güç sisteminin analizi harmonik tanım bölgesinde gerçekleştirilmektedir. Böylece, hibrit yöntemler sayesinde, zaman tanım bölgesi yöntemlere göre daha kısa çözüm süresinde, harmonik tanım bölgesi yöntemlere göre daha hassas sonuçlar elde edilmesi hedeflenmiştir.

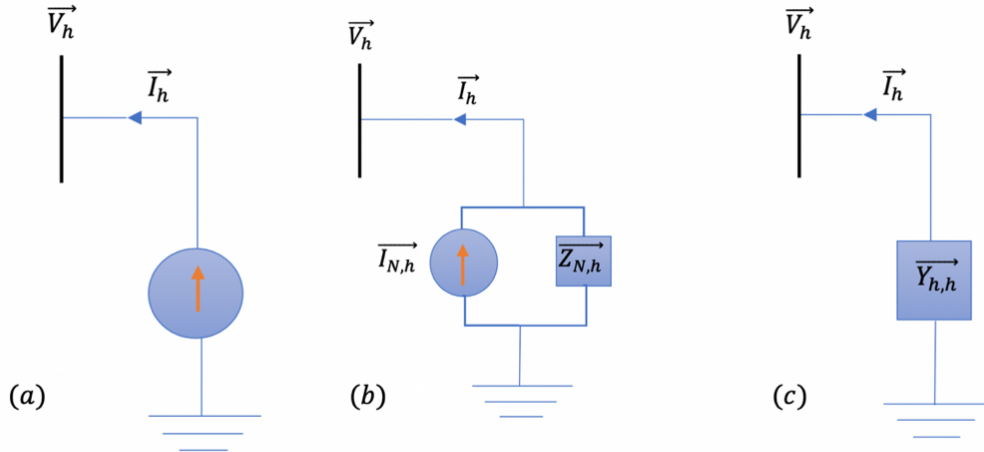
Literatürdeki, harmonik analiz algoritmaları, Harmonik Etkileşim Analizi (HEA), İteratif Harmonik Etkileşim Analizi (İHEA), Basitleştirilmiş Harmonik Güç Akışı (BHGA) ve Tam Harmonik Güç Akışı (THGA) olarak dört farklı sınıfa ayrılmaktadır [47], [59]. Harmonik Akım Kaynağı (HAK) [60]–[65], Thevenin veya Norton Eşdeğer Devre (NED) [66], [67]–[69] ve Çapraz Frekans Admittans Matris (ÇFAM) [70]–[73] modelleri harmonik üreten yüklerin ve FDÜB'lerin frekans tanım bölgesinde harmonik analizleri için önerilmiş yaygın olarak bilinen modellerdir.

Ulaşılabilen literatürde FDÜB'lerin harmonik analizlerinin genellikle HEA algoritması ve HAK model kullanılarak gerçekleştirildiği görülmüştür. Bunun sebebi HEA ve HAK algoritma-model çiftinin, diğer algoritma-model kombinasyonlarına göre daha pratik ve hızlı uygulanabilmesidir.

2.4.1 Harmonik Üreten Yük ve Dağıtık Üretim Birimi Modelleri: HAK, NED ve ÇFAM

Harmonik üreten yükler ve dağıtık üretim birimlerinin, harmonik tanım bölgesinde modellenmesi; bu elemanların harmonik üretme davranışını temsil eden basitleştirilmiş eşdeğer devrenin oluşturulması manasına gelmektedir. Bu modeller ile harmonik analiz yöntemleri kullanılarak güç sistemlerinin yük akışı ve harmonik kirlilik bilgilerine erişilebilmektedir. Buna ek olarak, analizlerin hassasiyeti seçilen modele göre farklılık arz edebilir.

Bu bölümde, literatürde harmonik üreten yükler ve dağıtık üretim birimleri için yaygın olarak bilinen modeller; HAK, NED ve ÇFAM modelleri tanıtılmıştır.



Şekil 2.8: (a) HAK, (b) NED ve (c) ÇFAM modellerinin eşdeğer devreleri.

Eşdeğer devresi Şekil 2.8 (a)'da görülen HAK modeli oluşturulurken; FDÜB'ün sinüzoidal besleme gerilimi altında sisteme verdiği akımın harmonik bileşenleri ölçülür. Böylece, bu elemanlar her bir harmonik numarası için ölçülen harmonik akımını sisteme veren bir akım kaynağı biçiminde ifade edilir. Bu model, gerilim harmonik bozulmasının akım harmonikleri

üzerine etkisini hesaba katmaz. Bu eksikliği gidermek için literatürde NED ve ÇFAM modelleri önerilmiştir.

Şekil 2.8 (b)'de verilen eşdeğer devreye sahip NED modelinde; FDÜB her bir harmonik numarası için bir akım kaynağı (h. harmonik Norton akım kaynağı) ve buna paralel bağlı bir empedans (h. harmonik Norton eşdeğer empedansı) olarak ifade edilir. h harmonik numarası için Norton akım kaynağı ($\bar{I}_{N,h}$) ve Norton eşdeğer empedansının ($\bar{Z}_{N,h}$) fazör değerleri, iki farklı şebeke besleme gerilimi altında alınan ölçümler kullanılarak hesaplanır. Buna göre, iki farklı test geriliminin h. harmonik fazör değerleri ($\bar{V}_{1,h}, \bar{V}_{2,h}$) ve bu test gerilimleri altında FDÜB'ün verdiği h. harmonik akımlarının fazör değerleri ($\bar{I}_{1,h}, \bar{I}_{2,h}$) cinsinden, $\bar{Z}_{N,h}$ ve $\bar{I}_{N,h}$ 'ye ait ifadeler Denklem (2.1)'de verilmiştir:

$$\bar{Z}_{N,h} = \frac{\bar{V}_{1,h} - \bar{V}_{2,h}}{\bar{I}_{2,h} - \bar{I}_{1,h}}, \quad \bar{I}_{N,h} = \bar{I}_{1,h} + \frac{\bar{V}_{1,h}}{\bar{Z}_{N,h}}, \quad \bar{I}_{N,h} = \bar{I}_{2,h} + \frac{\bar{V}_{2,h}}{\bar{Z}_{N,h}} \quad (2.1)$$

Diğer taraftan, NED modelinde gerilim ve akıma ait çapraz harmonikler arasındaki ilişki dikkate alınmamıştır. Bu durum [74]'de NED modelin bir dezavantajı olarak işaret edilmiş ve aynı çalışmada harmonik üreten yükler için gerilim ile akımın aynı harmonik numaraları yanı sıra farklı harmonik numaraları arasındaki ilişkiyi de hesaba katan Çapraz Frekans Admittans Matris (ÇFAM) modeli önerilmiştir.

Eşdeğer devresi Şekil 2.8 (c)'den görülen ÇFAM modelin ifadesi Denklem (2.2)'de verilmiştir:

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \\ \vdots \\ \bar{I}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{1,1} & \cdots & \bar{Y}_{1,j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{Y}_{k,1} & \cdots & \bar{Y}_{k,j} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_1 \\ \bar{V}_2 \\ \vdots \\ \bar{V}_j \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

ÇFAM modelinin harmonik üreten yükler için [74]'de önerilen ve bu tez kapsamında FDÜB'lere uygulanacak oluşturulma yöntemi aşağıda iki adım halinde özetlenmiştir:

İlk adım: Sinüzoidal gerilim altında FDÜB'ün verdiği k. harmonik akımlarının fazör değerleri ve bara geriliminin temel frekans fazör değeri Denklem (2.3)'de yerlerine konularak ÇFAM'nın ilk sütunundaki elemanlar hesaplanır:

$$\bar{Y}_{k,1} = \frac{\bar{I}_k}{\bar{V}_1} \quad (k = 1 \dots h_s) \quad (2.3)$$

Bu ifadede h_s modelin oluşturulmasında dikkate alınan en yüksek harmonik numarasıdır.

İkinci adım: Her bir test durumu için sadece temel harmonik ve temel olmayan bir harmonik içeren bara gerilimleri altında FDÜB'ün verdiği akım harmonikleri ölçülür. Böylece matrisin birinci sütunu haricindeki geri kalan sütunlarında yer alan elemanlar Denklem (2.4)'den hesaplanır:

$$\bar{Y}_{kj} = \frac{\bar{I}_k - \bar{Y}_{k1}\bar{V}_1}{\bar{V}_j} \quad (j = 2 \dots h_s) \quad (2.4)$$

Buraya kadar bahsedilen HAK, NED ve ÇFAM modellerinin çeşitli harmonik üreten yükler için hassasiyet analizleri literatürde bazı çalışmalarda incelenmiştir [48], [75]. Ancak, FDÜB'ler için bu modellerin hassasiyet analizine ilişkin bir çalışmaya ulaşılabilen literatürde rastlanmamıştır.

2.4.2 Harmonik Analiz Algoritmaları

Daha önce belirtildiği gibi literatürde yaygın olarak bilinen harmonik analiz algoritmaları, Harmonik Etkileşim Analizi (HEA), İteratif Harmonik Etkileşim Analizi (İHEA), Basitleştirilmiş Harmonik Güç Akışı (BHGA) ve Tam Harmonik Güç Akışı (THGA) olarak dört farklı sınıfa ayrılmaktadır. Bununla birlikte, İHEA ve BHGA algoritmaları, sistemin harmonik üreten yüklerin ve FDÜB'lerin bulunduğu baralara indirgenmesini gerektirmeleri sebebiyle özellikle büyük sistemler için pratik değildirler [47]. Bu sebeple tez kapsamında yapılan analiz çalışmalarında, HEA ve THGA algoritmaları dikkate alınmış olup bu iki algoritmaya ilişkin detaylı bilgi aşağıda sunulmuştur:

2.4.2.1 Harmonik Etkileşim Analizi (HEA)

En basit yapıya sahip harmonik analiz metodu olan HEA'nın akış diyagramı Şekil 2.9'da verilmiştir. Bu şekilden görüldüğü üzere HEA'da önce temel frekans güç akışı veya geleneksel güç akışı (GGA) yapılıp her bir baraya ait temel harmonik gerilimleri hesaplanır.

Daha sonra, doğrusal (harmonik üretmeyen) yükler, hatlar ve pasif kompanzasyon elemanlarının harmonik admittansları ile HÜY ve FDÜB modelleri kullanılarak Düğüm Gerilimleri (DG) yöntemiyle baralardaki harmonik gerilimleri hesaplanır.

DG yöntemi uygulanırken, her bir güç sistem elemanının h. harmonik admittanslarının hesabı aşağıda maddeler halinde sunulmuştur:

- Doğrusal (harmonik üretmeyen) yükler için h. harmonik admittansı, yükün temel harmonik aktif güç (P_1) ve temel harmonik reaktif güç (Q_1) değerleri ile GGA'da bulunan yükün bağlı olduğu baranın temel harmonik geriliminin rms değeri (V_1) cinsinden,

$$\bar{Y}_h = \frac{P_1}{V_1^2} - \frac{jQ_1}{hV_1^2} \quad (2.5)$$

ifadesiyle,

- Kompanzasyon kondansatörleri için h. harmonik admittansı, kondansatörün temel harmonik reaktif güç değeri (Q_1) ile GGA'da bulunan kondansatörün bağlı olduğu baranın temel harmonik geriliminin rms değeri (V_1) cinsinden,

$$\bar{Y}_h = h \frac{jQ_1}{V_1^2} \quad (2.6)$$

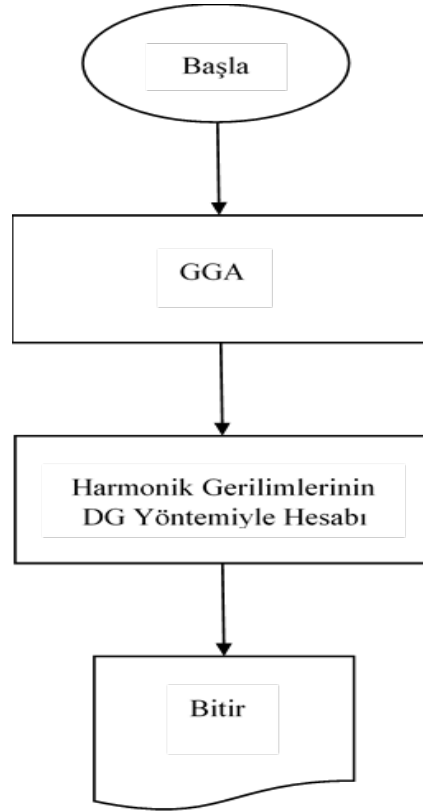
ifadesiyle,

- Hatlar için h. harmonik admittansı, hattın direnci (R) ve indüktif reaktansı (X) cinsinden,

$$\bar{Y}_h = \frac{1}{R + jhX} \quad (2.7)$$

ifadesiyle hesaplanmıştır.

Ayrıca, DG yöntemi uygulanırken, HAK model GGA'da hesaplanan yüke ait temel harmonik akım genliği, NED model ise GGA'da hesaplanan yüke ait temel harmonik akım ve temel harmonik empedans genlikleri dikkate alınarak güncellenip kullanılır.



Şekil 2.9: HEA'nın akış diyagramı.

2.4.2.2 Tam Harmonik Güç Akışı (THGA)

HEA'da baralara ait harmonik gerilimlerinin hesabı güç akışı analizinin içine dahil edilmemiştir. THGA'da ise harmonik gerilimlerin hesabı güç akışı döngüsünün içine dahil edilmiştir. Bu metot iki farklı biçimde gerçekleştirilebilmektedir.

Bunlardan ilkinde; güç hesabı sadece temel harmonik için yapılırken, bara gerilimlerinin hesabında tüm harmonik bileşenleri dikkate alınmıştır. Buna göre, ilk tip THGA için PV barasına ait kısıtlamalar,

$$P_i = Re \left\{ \bar{V}_i^1 (\sum_{j=1}^n \bar{Y}_{ij}^1 \bar{V}_j^1)^* \right\}, \quad V_i = \sqrt{\sum_{h \geq 1} (V_i^h)^2} \quad (2.5)$$

ifadeleridir. PQ barasına ait kısıtlama ise;

$$\bar{S}_i = \bar{V}_i^1 (\sum_{j=1}^n \bar{Y}_{ij}^1 \bar{V}_j^1)^* \quad (2.6)$$

ifadesidir.

İkinci tip THGA'da ise hem güç hem de gerilim hesabında tüm harmonikler dikkate alınmıştır. Buna göre ikinci tip THGA için PV barasına ait kısıtlamalar,

$$P_i = \text{Re} \left\{ \sum_{h \geq 1} \bar{V}_i^h \left(\sum_{j=1}^n \bar{Y}_{ij}^h \bar{V}_j^h \right)^* \right\}, \quad V_i = \sqrt{\sum_{h \geq 1} (V_i^h)^2} \quad (2.7)$$

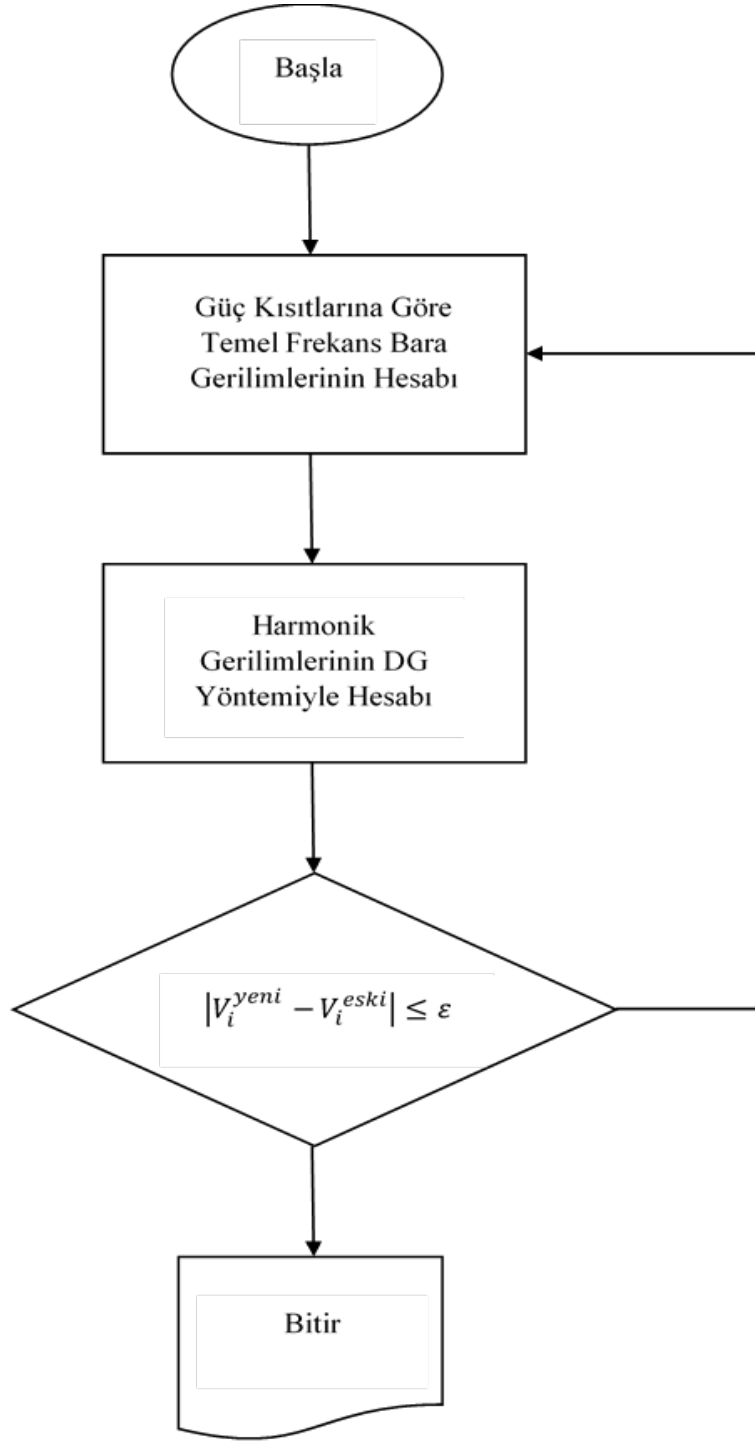
ifadeleridir. PQ barasına ait kısıtlama ise;

$$\bar{S}_i = \sum_{h \geq 1} \bar{V}_i^h \left(\sum_{j=1}^n \bar{Y}_{ij}^h \bar{V}_j^h \right)^* \quad (2.8)$$

ifadesidir.

Bu ifadelerde yer alan, \bar{V}_i^h ve \bar{Y}_{ij}^h i. baraya ait h. harmonik geriliminin fazör değeri ve i. ile j. baralar arası admittansın fazör değeri, V_i i. bara geriliminin toplam rms değeri, P_i i. bara aktif gücü, \bar{S}_i i. bara kompleks gücüdür.

Bu tezde yapılan çalışmalarda, yüklerin ve FDÜB'ün temel frekans için anma güçleri bilinmesi sebebiyle ilk tip THGA uygulanmıştır. Uygulanan THGA'nın akış diyagramı Şekil 2.10'da verilmiştir.



Şekil 2.10: THGA'nın akış diyagramı.

2.5 Güç Sistemlerinin Dağıtık Üretim Birimleri İçin Harmonik Kısıtlı Barındırma Kapasitesi

FV hücreler, rüzgar türbinleri, biyokütle, küçük hidro ve yakıt hücreleri temelli elektrik üreten dağıtık üretim birimleri (DÜB), gerilim profilinin iyileştirilmesi, sistem güvenilirliğinin artırılması, hatlardaki güç kaybının azaltılması ve enerji verimliliğinin

arttırılması bakımından avantajlar sağladığından, günümüz dağıtım sistemlerinde yaygın şekilde yer almaktadır [1], [2].

Ancak, DÜB'ler sistemin barındırma kapasitesi dikkate alınmadan uygun olmayan boyutlarda ve şebeke bağlantı noktalarında planlandığı takdirde, sistemde aşırı gerilimlere ve kayıp artışlarına yol açabilir [76]–[78]. Bu sebeple, özellikle fotovoltaik enerji ve rüzgar enerjisi temelli DÜB'lerin optimal boyutlandırılması ve bağlantı yeri belirlenmesi üzerine literatürde çeşitli çalışmalar yapılmıştır [2], [79]–[81]. Literatürde, optimal DÜB boyutlandırma ve yerleştirme probleminin çözümünde geleneksel olarak; (i) hat kayıplarının minimizasyonu, (ii) gerilim regülasyonu ve kısa devre akımlarıyla ilgili indislerin en iyileştirilmesi ve (iii) DÜB'lerin toplam gücünün maksimizasyonu amaçlarının çeşitli kombinasyonları hedeflenmiştir. Bu geleneksel çalışmalarda, optimizasyon problemine dahil edilen kısıtlar ise; bara gerilim sınır değerleri, kısa devre akım sınır değerleri, DÜB kapasitesi ve istenilen güç faktörü aralığı şeklinde sıralanabilir [8].

Diğer taraftan, sinüzoidal olmayan (harmonik bozulmaya sahip) akım çeken güç elektroniği devreleri temelli doğrusal olmayan yüklerin günümüz güç sistemlerinde kullanımı artmıştır. Bu yüklerin güçleri ve sayılarındaki büyüme neticesinde, hat akımları ve bara gerilimlerinin harmonik bozulma değerleri artış göstermiştir. Harmonik bozulma, enerji sağlayıcı ve tüketicilere ait elemanlar üzerinde kayıp artışları, aşırı ısınma ve ömür kaybı gibi problemlere sebep olan bir güç kalitesi problemi [9]. Bahsedilen olumsuz etkilerin azaltılması amacıyla, IEEE ve IEC gibi çeşitli organizasyonlar tarafından, güç sistemlerinde akım ve gerilim harmoniklerinin sınırlandırılmasına ilişkin standartlar hazırlanmıştır. Bu standartlar arasında; IEEE 1547, IEC 61727, IEEE 929, IEC 61000-3 ve EN 50160 sayılabilir [6].

Yine son yıllarda yayımlanan çalışmalarda [8], [13], [25], [26], [28], [51], [82]–[85] evirici devresi vasıtasıyla güç sistemlerine bağlanan DÜB'lerin boyutlandırılması ve yerleştirilmesi için harmoniklerle alakalı sınırlamalar dikkate alınmaya başlanmıştır. Bu çalışmalardan biri olan [25]'de, IEEE Standart 519 da tanımlı harmonik sınırlamalar aşılmadan sisteme dahil olabilecek azami DÜB gücünün belirlenmesi hususu radyal dağıtım sistemlerinin sabit (uniform), doğrusal olarak artan ve doğrusal olarak azalan yüklenme durumları için ele alınmıştır. Böylece, bu üç özel sistem durumu altında geçerli olan, harmonikli şartlarda

sisteme dahil olabilecek azami DÜB gücünün belirlenmesi için kapalı form ifadeler ortaya konmuştur.

Başka bir çalışmada [82], sistemin azami dağıtık üretim kapasitesi hesabı, her bir harmonik numarası ve toplam gerilim harmonik bozulma indisleri için IEEE 519 standardında tanımlı sınırlamalar ile bara gerilimi limitleri kısıt olarak dikkate alınarak; bir optimizasyon problemi şeklinde tanımlanmıştır. Tanımlanan problem, evirici devreli DÜB ile birlikte doğrusal olmayan elemanların bulunduğu IEEE 18 baralı test sistemi için çözülmüştür. DÜB'lerin optimal yerleştirilmesinin, azami dağıtık üretim kapasitesine etkisi bu çalışmada ortaya konulmuştur.

Referans [26] ise FDÜB'lerin bulunduğu sistemlerde harmonik kirliliğin IEEE 519 standardı limitlerini aşabileceği, ayrıca sistemde bulunan güç faktörü düzeltme kondansatörlerinin, DÜB kaynaklı harmonik akımlarında rezonans problemine yol açabileceği işaret edilmiştir. Bu durum sistemin DÜB barındırma kapasitesini azaltan bir kısıt olarak ele alınmıştır. Aynı çalışmada, pasif filtre kullanımının sistemde DÜB sebebiyle meydana gelen harmonik kirliliği IEEE 519 standardında belirtilen seviyelerin altına çekebileceği ve böylece harmonik kirlilik sınırları göz önünde bulundurularak izin verilen DÜB barındırma kapasitesinin iyileştirilebileceği belirtilmiştir. Bu çalışmaya benzer sonuçlar, [84]'de yer alan çalışmada da vurgulanmıştır.

Referans [27]'de, IEEE 519 standardında tanımlı gerilim harmonik sınırlamaları ile bara etkin değer gerilimi limitleri kısıt olarak dikkate alınıp DÜB'lerin sisteme azami katılım oranının maksimizasyonu amaçlanarak; DÜB'lerin optimum yer ve boyut tespiti problemi IEEE 18 ve 33 baralı test sistemleri için çözülmüştür.

2015 yılında yayımlanan Bollen ve arkadaşlarının bir çalışmasında [86] ise; ilk defa “harmonik barındırma kapasitesi” (“the harmonic hosting capacity”) terimi zikredilmiştir. Bu terimin tanımı “bir baraya bağlanabilecek Rüzgâr Enerjisi Santralının harmonik kirlilik bakımından izin verilen azami bağlantı kapasitesi” olarak ifade edilmiştir. Ayrıca, tanımlanan bu azami bağlantı kapasitesinin hesabı için gerilim harmonik sınırlamaları dikkate alınarak pratik bir yöntem önerilmiştir. Bu pratik yöntemde, barındırma kapasitesi hesaplanacak olan bara için; şebeke ve DÜB taraflarının harmonik Norton eşdeğer devreleri ve basit devre çözüm teoremleri kullanılarak bağlantı noktası harmonik gerilimi

hesaplanmıştır. Böylece, hesaplanan en yüksek değerli bara harmonik geriliminin, ilgili standartta tanımlı sınır değeri aşmayacağı FDÜB güç değeri, o bağlantı noktası için sistemin harmonik kısıtlı DÜB barındırma kapasitesi olarak belirlenmiştir.

Mohammedi ve arkadaşlarının çalışmasında [8] ise; doğrusal olmayan (harmonik üreten) yükler bulunan bir güç sisteminde, pasif filtreler ve DÜB'lerin eş zamanlı olarak optimal yerleştirilmesi ve boyutlandırması problemi çözülmüştür. Bu optimizasyon probleminin amacı; gerilim toplam harmonik bozulması (THDV), toplam hat kayıpları, dağıtık üretim tesislerinin yatırım maliyeti ve yerleştirilen pasif filtrelerin yatırım maliyetlerinin minimizasyonu olarak seçilmiştir. Çalışmada kısıt olarak bara gerilim etkin değer limitleri, kararlılık limitleri, harmonik bozulma limitleri, pasif filtre sayısı, DÜB'lerin kapasite limitleri ve sayısı dikkate alınmıştır.

Ghaffarzadeh ve Sadeghi tarafından yapılan çalışmada [51], evirici devreli DÜB'ler ile kompanzasyon kondansatörleri için optimal boyutlandırma ve yerleştirme problemi, amaç fonksiyonu olarak; kayıpların, enerji maliyetinin ve gerilim profilinin iyileştirilmesinin seçildiği, kısıt olarak geleneksel barındırma kapasitesi sınırlamaları yanı sıra bara THDV sınırlamasının dikkate alındığı, bir şekilde ifade edilip çözülmüştür.

Sakar ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmalarda [15], [29], geleneksel bara gerilimi ve hat akımı sınırlamaları yanı sıra, harmonik sınırlamaları ve istenilen güç faktörü aralığının kısıtlar, amacın ise harmonik barındırma kapasitesinin maksimizasyonu olarak seçildiği optimal harmonik filtre tasarım problemi çözülmüştür. Bu çalışmalardan ilkinde test sistemi, merkezi eviricili bir FDÜB, C-tipi harmonik filtre ve doğrusal olmayan yükler içeren iki baralı tipik bir dağıtım sistemidir. İkinci çalışmada ise; test sisteminde doğrusal olmayan yükler ile birlikte tek ayarlı bir filtre ve çok sayıda dizi eviricili FDÜB'ler dikkate alınmıştır. Her iki sistem durumu için farklı kaynak ve yük harmonik kirlenme seviyeleri için pasif filtrelerin sistemin harmonik sınırlı barındırma kapasitesini önemli ölçüde iyileştirdiği görülmüştür.

Literatürdeki bu çalışmaların amaç fonksiyonları ve sınırlandırılmaları dikkate alınarak Tablo 2.1 oluşturulmuştur.

Tablo 2.1: Literatürdeki önemli çalışmaların amaç fonksiyon ve sınır kavramları.

| Amaç Fonksiyonu | Kısıtlar | | | | |
|---|--|-------------------------------------|------------------|------------------------|------------------------|
| | THDV (%) (IEEE519) | Vrms | Güç kayıpları | Güç faktörü | Pasif filtre |
| Maksimum barınma kapasitesi (BK) | [23],[81], [24],[83],[25],[85], [51],[26],[27] | [25], [85],[8],[51] [26],[27] | [8],[51] | [24],[83] [26],[27] | [24],[83], [8] |
| Enerji maliyeti | [8],[51],[8] | [8],[51] | [8],[51] | - | [8] |
| THDV | [51],[26],[27],[8] | [51],[26],[27], [8] | [8] | - | [51],[26],[27], [8] |

2.6 Sonuç

Bu bölümde, öncelikle fotovoltaik enerji temelli dağıtık üretim birimleri tanıtılmış ve bunların sebep olduğu en önemli güç kalitesi sorunları arasında yer alan gerilim dalgalanması/yükselmesi ile harmonik kirlilik olayları ve bu sorunları sınırlandırmak için düzenlenmiş uluslararası standartlar hakkında bilgi verilmiştir.

Devamında, harmonik kirliliği azaltmak için kullanılan pasif filtreler, doğrusal olmayan yükler ve FDÜB'ler için frekans tanım bölgesi harmonik modelleri ve harmonik analiz algoritmaları ile güç sistemlerinin harmonik kısıtlı barındırma kapasitesi üzerine literatürdeki çalışmalar incelenmiştir.

Gerçekleştirilen literatür taramasında, FDÜB'ler için harmonik modellerin hassasiyet analizi üzerine bir çalışmaya rastlanmamıştır. Ayrıca, FDÜB'ler için harmonik modelleri ile harmonik analiz algoritmalarının çeşitli kombinasyonlarının karşılaştırmalı analizinin herhangi bir çalışmada ele alınmadığı görülmüştür.

Diğer taraftan, harmonik bozulmaya sahip sistemler için FDÜB barındırma kapasitesinin en iyileştirilmesi amacıyla iki baralı bir sistemde optimal pasif filtre boyutlandırma probleminin Sakar ve arkadaşları tarafından çözüldüğü tespit edilmiştir. Ancak, harmonik kirliliğe sahip

sistemlerin FDÜB barındırma kapasitesini en iyileştirmeyi amaçlayan optimal FDÜB ve pasif filtre boyutlandırma ve yerleştirme yaklaşımının ulaşılabilen literatürde henüz çalışılmadığı sonucuna varılmıştır.

Literatürdeki bu boşlukların giderilmesi tezin amaçları olarak dikkate alınarak ileriki bölümlerde harmonik modellerinin FDÜB'ler için hassasiyet analizi gerçekleştirilmiştir. Yine ileriki bölümlerde çeşitli harmonik model-algoritma çiftleri dikkate alınarak optimal FDÜB ve PF boyutlandırma ve yerleştirme problemi IEEE 33 baralı test sistemi için çalışılmıştır.

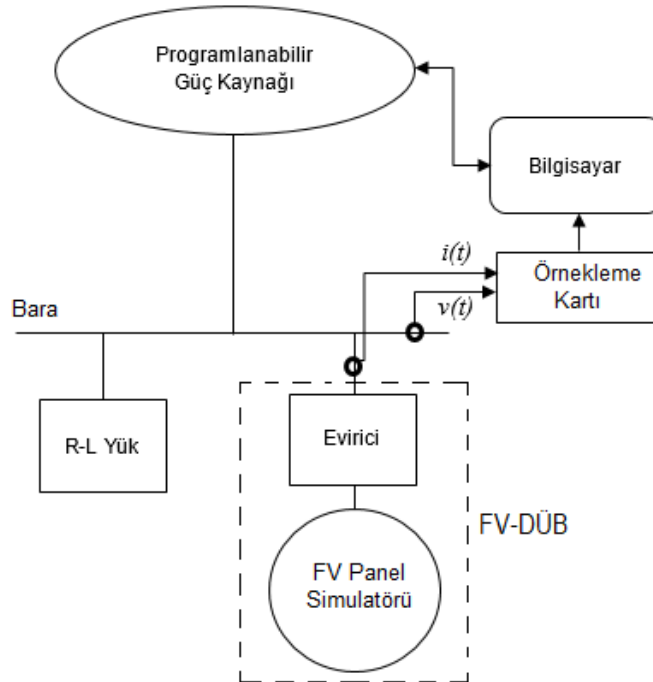
3. MODELLERİN ÖLÇÜM TEMELLİ HASSASİYET ANALİZİ

Bu bölümde, ilk önce, tez kapsamında kurulan test sistemi tanıtılmıştır. Bu test sisteminin kurulmasındaki amaçlar;

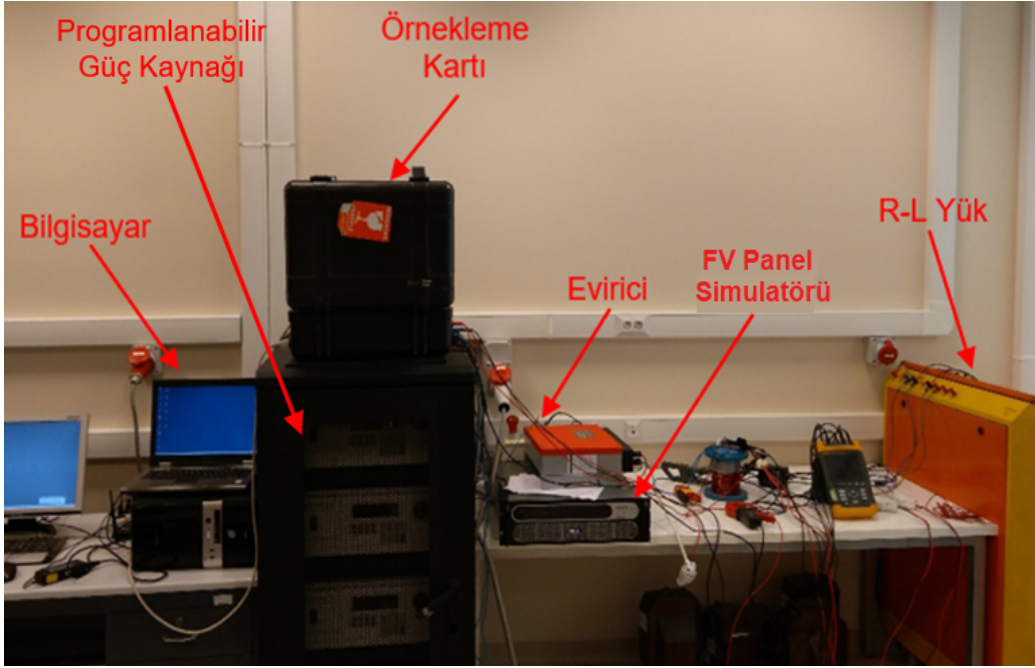
- (i) FDÜB'lerin farklı toplam harmonik bozulma seviyeleri ve harmonik bileşenlere sahip çok sayıda bağlantı noktası gerilimleri altındaki akım harmonik bozulma seviyelerini istatistiksel olarak incelemek,
 - (ii) Sistemde yer alan FDÜB için HAK, NED ve ÇFAM modellerini oluşturmak,
 - (iii) Oluşturulan modellerin farklı harmonik karakteristiğe sahip çok sayıda bağlantı noktası gerilimleri altında FDÜB'lerin enjekte ettiği akım harmoniklerinin hesabında hassasiyetlerini istatistiksel olarak analiz etmek,
- olarak sıralanabilir.

3.1 Test Sisteminin Tanıtılması

FDÜB'ün akım harmoniklerinin incelenmesi ve model hassasiyet analizleri için gerekli ölçümlerin alındığı test sistemi Şekil 3.1'de verilen şematiğe göre kurulmuştur. Kurulan bu sistemin fotoğrafı Şekil 3.2'de sunulmuştur.



Şekil 3.1: Test sisteminin şematiği.



Şekil 3.2: Test sisteminin fotoğrafı.

Test sisteminde, rastgele dalga şekline sahip gerilimler üreten programlanabilir güç kaynağı (California Instruments 3001ix), tek fazlı ev tipi FDÜB (evirici+fotovoltaik panel simülatörü), resistif-indüktif empedans (R-L) yük, test gerilimlerinin harmonik içeriğini hazırlayan Labview programının çalıştırıldığı ve ölçüm sonuçlarının aktarıldığı bir bilgisayar, bara geriliminin ($v(t)$) ve FDÜB akımının ($i(t)$) ölçülmesi için kullanılan örnekleme kartı (IOtech Wavebook 512) bulunmaktadır.

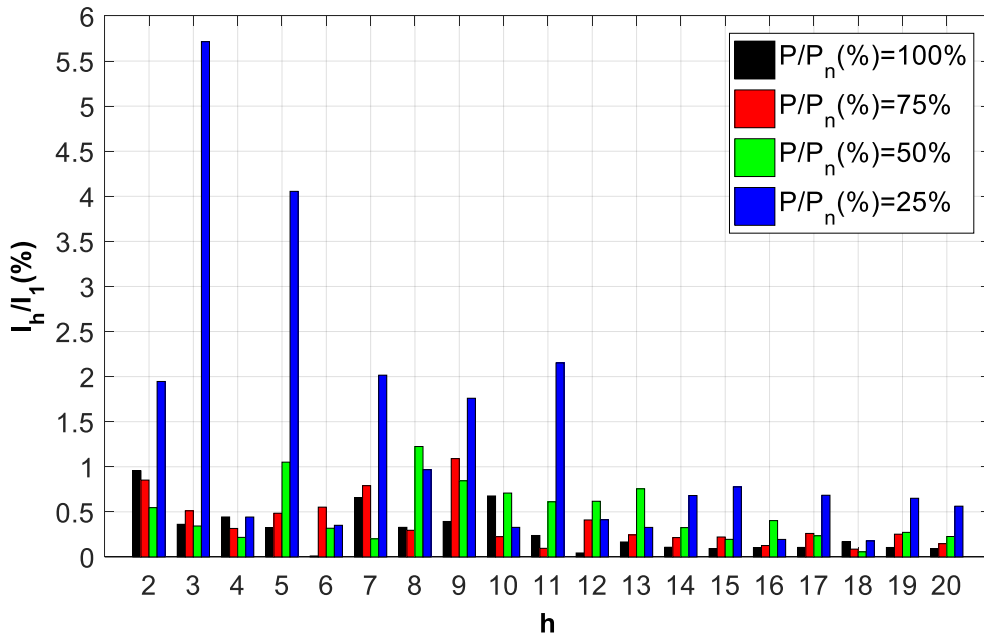
Bu sistemde, farklı harmonik bileşenlere sahip çok sayıda gerilim dalga şekli için yapılan testler Labview kodu kullanılarak; zaman bakımından verimli ve veri toplanmasında herhangi bir hataya mahal vermeyecek biçimde gerçekleştirilmiştir. Labview ile kontrol edilen Programlanabilir Güç Kaynağının oluşturacağı gerilim dalga şekillerinin harmonik içeriği “IEC 61000-3-6” standardına göre Tablo 3.1'e uygun olarak her bir harmonik genliğinin rastgele atanmasıyla oluşturulmuştur. Daha detaylı anlatmak gerekirse, aynı gerilim harmonik bozulma değeri farklı kombinasyonlarda ayarlanmış (“tune” edilmiş) harmonik birleşenlerle oluşturulmuştur.

Tablo 3.1: IEC 61000–3–6’da tanımlı gerilim harmonik sınır değerleri.

| 3’ün katı olmayan tek harmonikler | | 3’ün katı olan tek harmonikler | | Çift harmonikler | |
|-----------------------------------|--------------------------|--------------------------------|---------------------|---------------------|----------------------------|
| Harmonik Sırası | Harmonik Gerilimi % | Harmonik Sırası | Harmonik Gerilimi % | Harmonik Sırası | Harmonik Gerilimi % |
| 5 | 5 | 3 | 4 | 2 | 1.8 |
| 7 | 4 | 9 | 1.2 | 4 | 1 |
| 11 | 3 | 15 | 0.3 | 6 | 0.5 |
| 13 | 2.5 | 21 | 0.2 | 8 | 0.5 |
| $17 \leq h \leq 49$ | $(1.9 \cdot 17/h) - 0.2$ | $21 < h \leq 45$ | 0.2 | $10 \leq h \leq 50$ | $(0.25 \cdot 10/5) + 0.22$ |

3.2 FDÜB’lerin Bozulmuş Gerilim Dalga Şekilleri Altında Davranışı

Sinüzoidal besleme gerilimi altında, %25, %50, %75 ve %100 yüklenme oranları (FDÜB gücünün anma güç değerine yüzde oranı: $P/P_n(\%)$) için FDÜB’e ait çıkış akımının harmonik spektrumu, temel frekans akımının yüzdesi cinsinden Şekil 3.3’de verilmiştir.

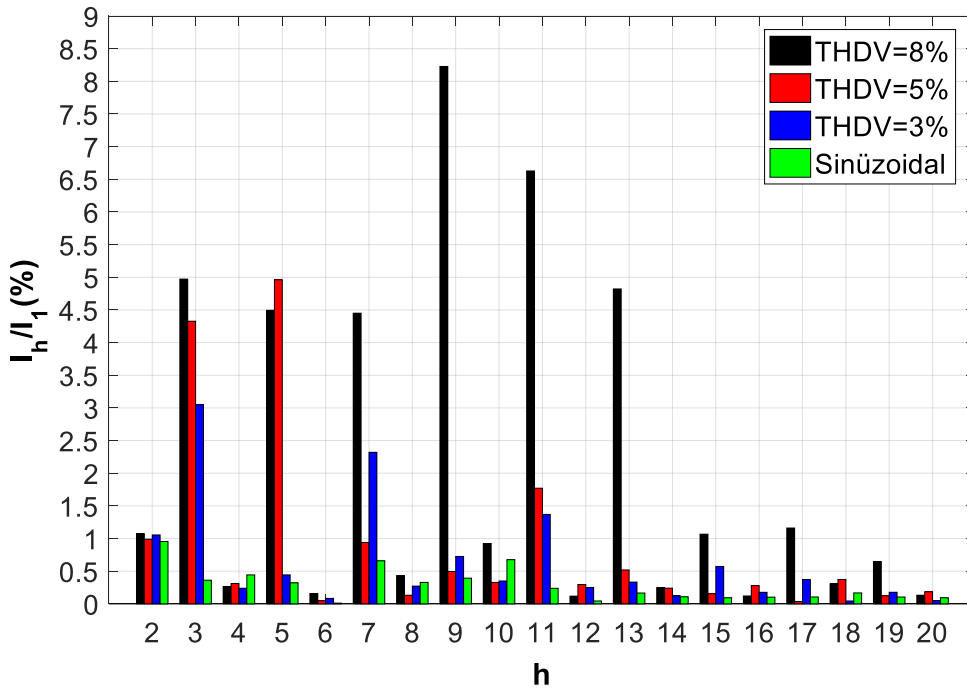


Şekil 3.3: Sinüzoidal gerilim altında fotovoltaik birimin %25, %50, %75 ve %100 yüklenme durumları için akım harmonik spektrumları.

Bu şekilden görüldüğü üzere FDÜB çıkış akımının harmonik bileşenleri, yüklenme değerinden farklı oranlarda etkilenmektedir. Bununla birlikte, aynı şekilden düşük yüklenme

oranlarında (özellikle %25 yüklenme oranı), FDÜB akımının harmonik bozulma miktarının arttığı ifade edilebilir. Şekil 3.3’de görüldüğü üzere tek harmonik numaraları yanı sıra çift harmonik numaralarının da FDÜB akımında kayda değer oranda bulunduğu gözlemlenmektedir.

Diğer taraftan, sinüzoidal gerilim ve dağıtım sistemlerinde görülme ihtimali yüksek olan tek numaralı harmonik bileşenler içeren %3, %5 ve %8 THDV değerlerine sahip üç farklı bozulmuş gerilim dalga şekli altında ve %100 yüklenme değerinde, FDÜB çıkış akımının harmonik spektrumları, temel frekans akımının yüzdesi cinsinden Şekil 3.4’de verilmiştir.



Şekil 3.4: Sinüzoidal gerilim ile %3, %5 ve %8 THDV değerlerine sahip test gerilimleri altında, %100 yüklenme durumu için fotovoltaik birimin akım harmonik spektrumları.

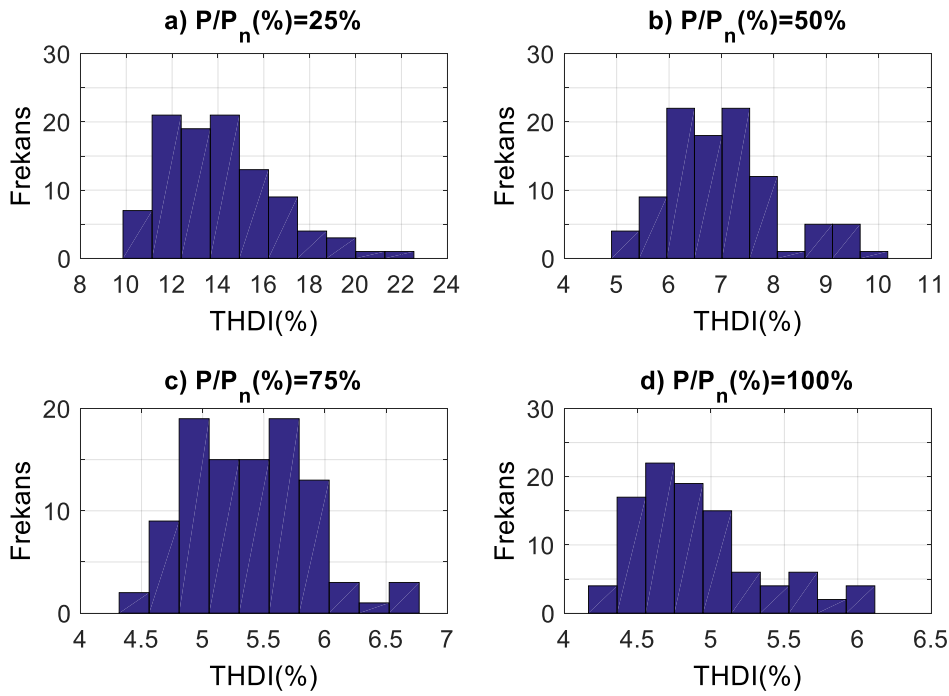
Bu şekilden, gerilim harmonik bozulmasındaki artışın FDÜB tek numaralı akım harmoniklerinde artışa yol açtığı, çift numaralı akım harmoniklerinin ise gerilim harmonik bozulmasından kayda değer bir şekilde etkilenmediği görülmektedir.

Bununla birlikte, %3, %5 ve %8 THDV değerlerine sahip tek harmoniklerden oluşan 100 farklı besleme gerilimi dalga şekli altında, %25, %50, %75 ve %100 yüklenme durumları için FDÜB’ün çıkış akımına ait THDI değerlerinin histogramları sırasıyla Şekil 3.5, Şekil 3.6 ve Şekil 3.7’de sunulmuştur. THDI’nın ifadesi Denklem (3.1)’de verilmiştir:

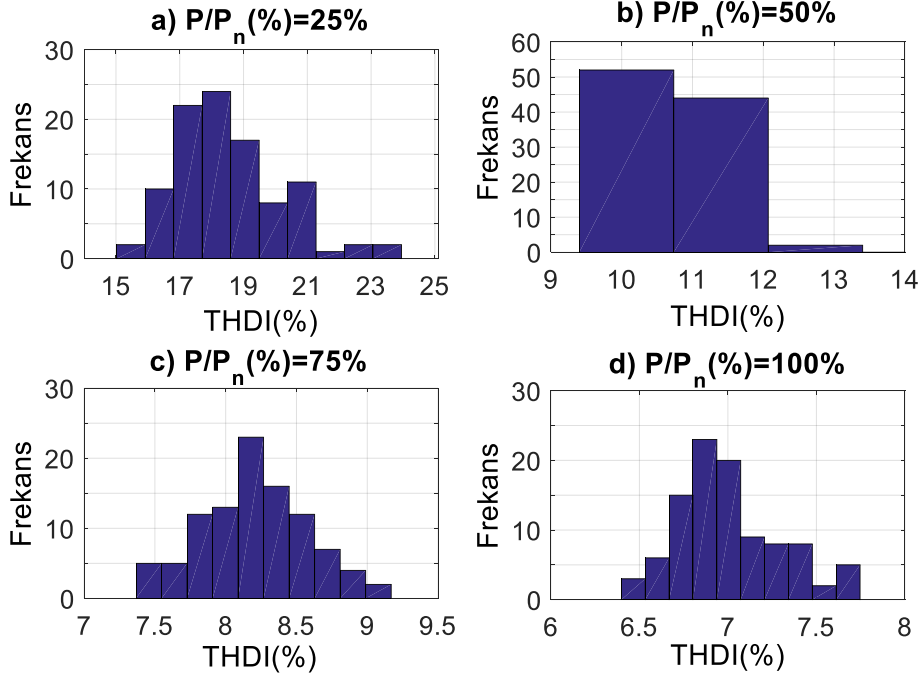
$$THDI(\%) = \frac{\sqrt{\sum_2^h I_h^2}}{I_1} \quad (3.1)$$

Bu ifadede, I_h h'inci harmonik numarasına sahip akımın rms değerini, I_1 temel harmonik akımının rms değerini ifade etmektedir.

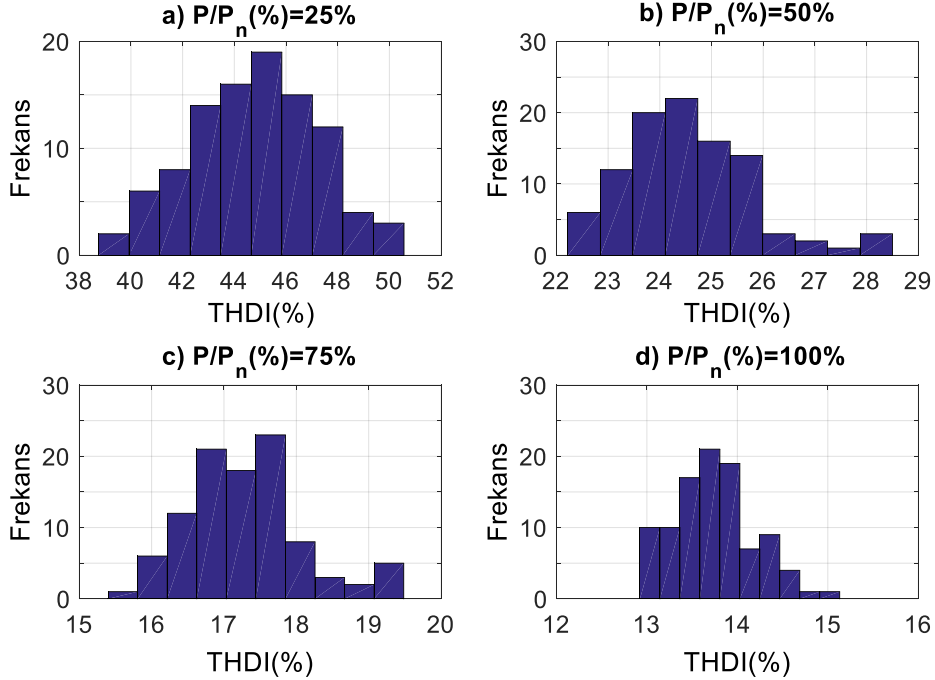
Bu histogramlardan, P/P_n'nin %25, %50, %75 ve %100 olduğu durumlarda, akımın THDI değerlerinin sırasıyla, THDV=%3 için %10-%22, %5-%10, %4-%7 ve %4-%6.5 aralıklarında, THDV=%5 için %15-%25, %9-%14, %7-%9.5 ve %6-%8 aralıklarında, THDV=%8 için %38-%52, %22-%29, %15-%20 ve %13-%16 aralıklarında değerler aldığı görülmektedir.



Şekil 3.5: THDV=%3 bozulmaya sahip ve birbirinden farklı harmonik bileşenler içeren 100 adet gerilim dalga şekli altında (a) %25, (b) %50, (c) %75 ve (d) %100 yüklenme durumlarında fotovoltaik birimin akımına ait THDI histogramları.



Şekil 3.6: THDV=%5 bozulmaya sahip ve birbirinden farklı harmonik bileşenler içeren 100 adet gerilim dalga şekli altında (a) %25, (b) %50, (c) %75 ve (d) %100 yüklenme durumlarında fotovoltaik birimin akımına ait THDI histogramları.



Şekil 3.7: THDV=%8 bozulmaya sahip ve birbirinden farklı harmonik bileşenler içeren 100 adet gerilim dalga şekli altında (a) %25, (b) %50, (c) %75 ve (d) %100 yüklenme durumlarında fotovoltaik birimin akımına ait THDI histogramları.

Bu histogramların, ortalama, ortanca ve standart sapma değerleri ise yine sırasıyla Tablo 3.2, Tablo 3.3 ve Tablo 3.4’de verilmiştir.

Tablo 3.2: Şekil 3.5’de sunulan THDI histogramlarının ortalama, ortanca ve standart sapma değerleri.

| P/P _n (%) | Ortalama Değer | Ortanca Değer | Standart Sapma Değeri |
|----------------------|----------------|---------------|-----------------------|
| 25 | 14.02 | 13.74 | 2.41 |
| 50 | 6.99 | 6.89 | 1.07 |
| 75 | 5.39 | 5.37 | 0.47 |
| 100 | 4.90 | 4.79 | 0.43 |

Tablo 3.3: Şekil 3.6’da sunulan THDI histogramlarının ortalama, ortanca ve standart sapma değerleri.

| P/P _n (%) | Ortalama Değer | Ortanca Değer | Standart Sapma Değeri |
|----------------------|----------------|---------------|-----------------------|
| 25 | 18.57 | 18.39 | 1.69 |
| 50 | 10.67 | 10.67 | 0.63 |
| 75 | 8.20 | 8.20 | 0.37 |
| 100 | 7.00 | 6.95 | 0.28 |

Tablo 3.4: Şekil 3.7’de sunulan THDI histogramlarının ortalama, ortanca ve standart sapma değerleri.

| P/P _n (%) | Ortalama Değer | Ortanca Değer | Standart Sapma Değeri |
|----------------------|----------------|---------------|-----------------------|
| 25 | 44.80 | 44.77 | 2.42 |
| 50 | 24.54 | 24.41 | 1.25 |
| 75 | 17.28 | 17.27 | 0.81 |
| 100 | 13.73 | 13.72 | 0.43 |

Bu tablolar, P/P_n’nin %25, %50, %75 ve %100 olduğu durumlarda, ölçülen FDÜB akımının ortalama THDI değerlerinin sırasıyla, THDV=%3 için %14.02, %6.99, %5.39 ve %4.90, THDV=%5 için %18.57, %10.67, %8.20 ve %7.00, THDV=%8 için %44.80, %24.54, %17.28 ve %13.73 olduğunu göstermektedir.

Sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, kaynağın harmonik bozulmasının (THDV’nin) FDÜB akımının harmonik bozulmasına (THDI’ya) etkisinin düşük güç seviyelerinde (yüklenme değerlerinde) daha fazla olduğu görülmektedir. Ayrıca, düşük güç seviyelerinde ölçülen THDI verilerinin standart sapmasının, yüksek güç seviyelerinde ölçülen THDI verilerinin standart sapma değerine göre daha büyük olduğu bir başka ifadeyle daha geniş

aralıklarda değişim gösterdiği gözlemlenmiştir. Ortalama ve ortanca değerlerin ise tüm ölçümlerde birbirine yakın olduğu tespit edilmiştir.

3.3 Modellerin Hata Analizi

Bölüm 3.2’de, FDÜB’lerin çeşitli harmonikli gerilim dalgaları altındaki davranışı incelenmiştir. Sonuçlar göstermektedir ki, bağlantı noktası gerilim harmonik bozulması (THDV), FDÜB akımına ait THDI değerleri üzerinde önemli derecede etkilidir. Bu çıktı harmonik analizlerinde kullanılacak FDÜB modellerinin hassasiyetlerinin tespitini, analiz sonuçlarının sağlıklı bir şekilde yorumlanabilmesi için elzem hale getirmektedir.

Bu ihtiyaç doğrultusunda, modellerin hassasiyetleri, sistemde bulunan FDÜB’ün düşük ve nominal yüklenme durumları için test edilmiştir. Testler sırasında kaynak geriliminin, %3, %5 ve %8 THDV seviyeleri için farklı harmonik içerikli 100'er dalga şekli durumu (300 dalga şekli) dikkate alınmıştır. Böylece, aşağıda iki madde halinde verildiği gibi 6 farklı yüklenme - kaynak test durumu için hassasiyet analizleri gerçekleştirilmiştir:

- (i) Düşük yüklenme oranı ($P/P_n = 25\%$) için %3, %5 ve %8 THDV değerindeki kaynak gerilimleri altında yapılmış analizler,
- (ii) Nominal yüklenme oranı ($P/P_n = 100\%$) için %3, %5 ve %8 THDV değerindeki kaynak gerilimleri altında yapılmış analizler.

IEEE 519 standardında akım harmonik bozulma değeri, sistemde talep edilen azami yük akımı (I_D) cinsinden bağıl olarak tanımlanmış ve sınırlama altına alınmıştır. Bir başka ifadeyle, bu standart akım harmonik bozulmasının ölçümünde indis olarak THDI yerine Denklem (3.2)’de ifadesi verilen TDD (toplam demand distorsiyon) indisini dikkate almıştır.

$$TDD(\%) = \frac{\sqrt{\sum_2^h I_h^2}}{I_D} \quad (3.2)$$

Bunun sebebi, THDI indisinin düşük yüklenme seviyelerinde gözlemlenen ve sistem için ihmal edilebilir değerlerdeki akım harmoniklerini, yanıltıcı bir şekilde önemli seviyelerde bozulma olarak derecelendirmesidir. Bu yaklaşıma paralel olarak, tez kapsamında yapılan model hassasiyet analizlerinde, FDÜB’ün tam yüklenme durumuna (anma akım değerine: I_D) göre bağıl olarak akım harmonik bozulmasının hesap edilmesine ve böylece modellerin

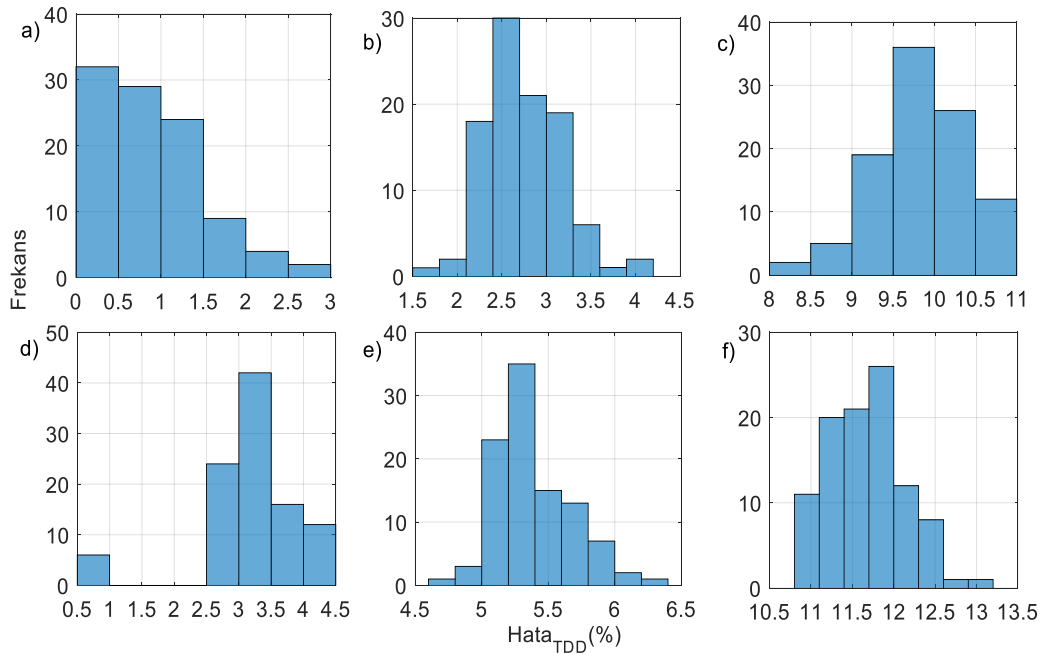
harmonik akımlarının hesabında kayda değer hatalar yapıp yapmadığını net bir şekilde tespit edilmesine imkan veren toplam talep bozulması (total demand distorsiyon, TDD) indisi kriter olarak dikkate alınmıştır. Bir başka ifadeyle, modellerin TDD hesabında yaptıkları hataların analizi hedeflenmiştir.

Bu doğrultuda, modellerin TDD hesabında yaptıkları hatanın büyüklüğü, Denklem 3.3’de gösterilen şekilde elde edilmiştir:

$$Hata_{TDD}(\%) = |TDD_M(\%) - TDD_C(\%)| \quad (3.3)$$

Denklem (3.3)’de, $TDD_M(\%)$ değeri test sisteminden ölçülen TDD değerini ve $TDD_C(\%)$ ise harmonik yük modelinden hesaplanan TDD değerini ifade etmektedir.

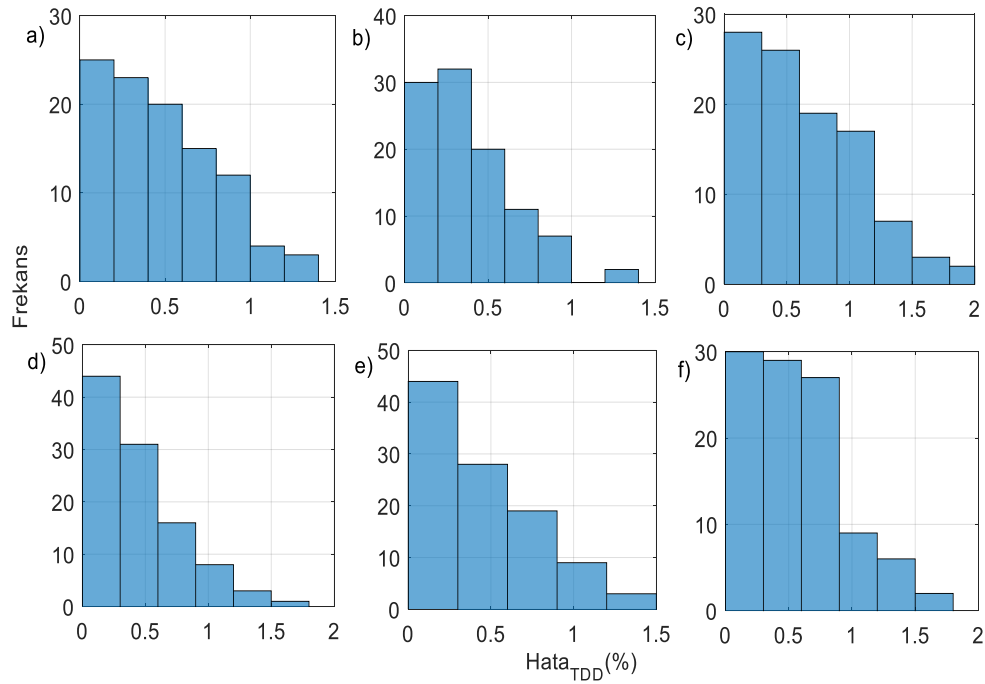
Buraya kadar verilen analiz yaklaşımına bağlı olarak elde edilmiş olan, HAK, NED ve ÇFAM modellerinin, FDÜB’ün her iki yüklenme durumunda test gerilimleri altında TDD hesabında yapmış oldukları hataların histogramları Şekil 3.8, Şekil 3.9 ve Şekil 3.10’da sunulmuştur. Bu histogramların, ortalama, ortanca ve standart sapma değerleri ise yine sırasıyla; Tablo 3.5, tablo 3.6 ve Tablo 3.7’de verilmiştir.



Şekil 3.8: (a) THDV=%3 ve P/Pn=%25, (b) THDV=%5 ve P/Pn=%25, (c) THDV=%8 ve P/Pn=%25, (d) THDV=%3 ve P/Pn=%100, (e) THDV=%5 ve P/Pn=%100 ile (f) THDV=%8 ve P/Pn=%100 durumlarında HAK modelinin Hata_{TDD} (%) histogramları.

Tablo 3.5: HAK modelinin Hata_{TDD} (%) histogramlarının ortalama, ortanca ve standart sapma değerleri.

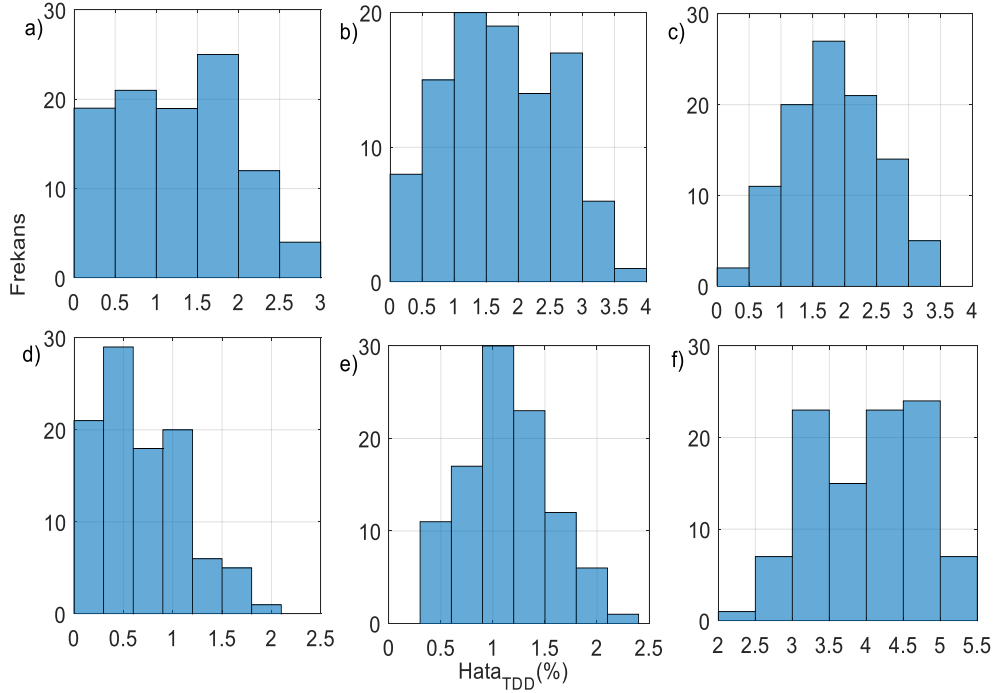
| Durum | Ortalama Değer | Ortanca Değer | Standart Sapma Değeri |
|-------|----------------|---------------|-----------------------|
| a | 0.89 | 0.81 | 0.62 |
| b | 2.74 | 2.66 | 0.43 |
| c | 9.84 | 9.80 | 0.54 |
| d | 3.16 | 3.19 | 0.77 |
| e | 5.39 | 5.33 | 0.28 |
| f | 11.67 | 11.67 | 0.44 |



Şekil 3.9: (a) THDV=3% ve P/Pn=25%, (b) THDV=5% ve P/Pn=25%, (c) THDV=8% ve P/Pn=25%, (d) THDV=3% ve P/Pn=100%, (e) THDV=5% ve P/Pn=100% ile (f) THDV=8% ve P/Pn=100 durumlarında NED modelinin Hata_{TDD} (%) histogramları.

Tablo 3.6: NED modelinin Hata_{TDD} (%) histogramlarının ortalama, ortanca ve standart sapma değerleri.

| Durum | Ortalama Değer | Ortanca Değer | Standart Sapma Değeri |
|-------|----------------|---------------|-----------------------|
| a | 0.47 | 0.43 | 0.32 |
| b | 0.38 | 0.34 | 0.27 |
| c | 0.63 | 0.56 | 0.46 |
| d | 0.43 | 0.37 | 0.35 |
| e | 0.44 | 0.35 | 0.34 |
| f | 0.55 | 0.53 | 0.37 |



Şekil 3.10: (a) THDV=%3 ve P/Pn=%25, (b) THDV=%5 ve P/Pn=%25, (c) THDV=%8 ve P/Pn=%25, (d) THDV=%3 ve P/Pn=%100, (e) THDV=%5 ve P/Pn=%100 ile (f) THDV=%8 ve P/Pn=%100 durumlarında ÇFAM modelinin $Hata_{TDD}$ (%) histogramları.

Tablo 3.7: ÇFAM modelinin $Hata_{TDD}$ (%) histogramlarının ortalama, ortanca ve standart sapma değerleri.

| Durum | Ortalama Değer | Ortanca Değer | Standart Sapma Değeri |
|-------|----------------|---------------|-----------------------|
| a | 1.24 | 1.36 | 0.71 |
| b | 1.71 | 1.59 | 0.90 |
| c | 1.83 | 1.84 | 0.72 |
| d | 0.68 | 0.61 | 0.44 |
| e | 1.13 | 1.09 | 0.41 |
| f | 4.02 | 4.10 | 0.70 |

Şekil 3.8'den (a) THDV=%3 ve P/Pn=%25, (b) THDV=%5 ve P/Pn=%25, (c) THDV=%8 ve P/Pn=%25, (d) THDV=%3 ve P/Pn=%100, (e) THDV=%5 ve P/Pn=%100, (f) THDV=%8 ve P/Pn=%100 durumlarında, HAK modelin $Hata_{TDD}$ değerlerinin sırasıyla %0-%3, %1.5-%4.5, %8-%11, %0.5-%4.5, %4.5-%6.5 ve %10.5-%13.5 aralıklarında olduğu görülmektedir. Şekil 3.9 ise (a)-(f) durumlarında, NED modelin $Hata_{TDD}$ değer aralıklarının sırasıyla %0-%1.5, %0-%1.5, %0-%2, %0-%2, %0-%1.5 ve %0-%2 olduğunu göstermektedir. ÇFAM modelin $Hata_{TDD}$ değer aralıkları ise Şekil 3.10'dan görüldüğü üzere

(a)-(f) durumlarında, sırasıyla %0-%3, %0-%4, %0-%3.5, %0-%2.5, %0-%2.5 ve %2-%5.5'dir.

Tablo 3.5'den, P/Pn'nin %25 ve %100 olduğu durumlarda, HAK modeline ait $Hata_{TDD}$ değerlerinin ortalamasının durum (a)-(f) için sırasıyla, %0.89, %2.74, %9.84, %3.16, %5.39 ve %11.67 olduğunu göstermektedir. Tablo 3.6'dan NED modeline ait $Hata_{TDD}$ değerlerinin ortalamasının durum (a)-(f) için sırasıyla, %0.47, %0.38, %0.63, %0.43, %0.44 ve %0.55 olduğu görülmektedir. Son olarak, Tablo 3.7'den görüldüğü üzere ÇFAM modeline ait $Hata_{TDD}$ değerlerinin ortalaması durum (a)-(f) için sırasıyla, %1.24, %1.71, %1.83, %0.68, %1.13 ve %4.02'dir. Bunlara ilaveten, tablolarda verilen sonuçlara göre; her üç modelin hatalarının ortalama ile ortanca değerlerinin birbirine yakın olduğu ve NED modelin standart sapma değerlerinin diğer iki modele göre daha küçük olduğu ifade edilebilir.

3.4 Sonuç

Bu bölümde, FDÜB'lerin akım harmoniklerinin hesabında, Harmonik Akım Kaynağı (HAK), Norton Eşdeğer Devre (NED) ve Çapraz Frekans Admittans Matris (ÇFAM) modellerinin hassasiyetinin karşılaştırmalı olarak analiz edilmesi amaçlanmıştır.

Bu çalışmalar için bir test sistemi kurulmuştur ve kurulan test sisteminde, FDÜB'lerin çeşitli yüklenme oranlarında, farklı THDV seviyelerinde ve harmonik bileşenlere sahip çok sayıda bağlantı noktası gerilimleri altında ölçümler alınmıştır. Ölçüm verilerinin bir kısmıyla modeller oluşturulmuştur. Geri kalan ölçüm verileri referans alınarak, modellerin FDÜB akımının Toplam Demand Distorsiyon indisinin (TDD) hesabında yaptıkları hata ($Hata_{TDD}$) değerleri istatistiksel olarak analiz edilmiştir. Ayrıca, FDÜB'lerin çeşitli yüklenme oranlarında, farklı THDV seviyelerinde ve harmonik bileşenlere sahip çok sayıda bağlantı noktası gerilimleri altında akım harmoniklerinin davranışı incelenmiştir.

Yapılan analizlerden;

- Bağlantı noktası gerilim harmonik bozulmasının (THDV'nin) FDÜB akımının harmonik bozulmasına (THDI'ya) etkisinin düşük güç seviyelerinde (yüklenme değerlerinde) daha fazla olduğu,
- Ayrıca, düşük güç seviyelerinde ölçülen THDI verilerinin standart sapmasının, yüksek güç seviyelerinde ölçülen THDI verilerinin standart sapma değerine göre

daha büyük olduğu bir başka ifadeyle daha geniş aralıklarda değişim gösterdiği,

- HAK ve ÇFAM modellerinin $Hata_{TDD}$ değerlerinin, THDV artışından ve yüklenme oranından dikkate değer derecede etkilendiği, ancak NED modeli için böyle bir durumun söz konusu olmadığı,
- Hassasiyet bakımından en iyiden en kötüye modellerin NED, ÇFAM ve HAK olarak sıralanabileceği,
- Genel olarak, NED model için elde edilen hata ölçümlerinin standart sapma değerlerinin, HAK ve ÇFAM modellerinin hatalarına ilişkin standart sapma değerlerine göre daha küçük olduğu dolayısıyla NED model için hatanın diğer iki modele göre daha kestirilebilir olduğu,

sonuçlarına varılmıştır.

4. IEEE 33 BARALI TEST SİSTEMİ İÇİN HARMONİK YÜK AKIŞI ALGORİTMALARININ KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ

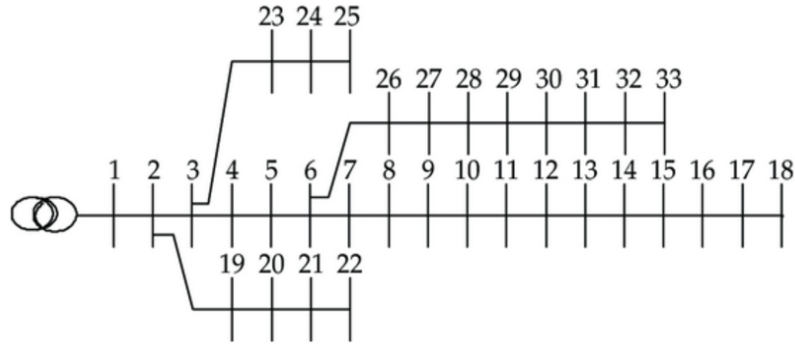
Bu bölümde, şematiği Şekil 4.1’de verilen IEEE 33 baralı test sisteminde, çeşitli FDÜB senaryoları için HEA-HAK, THGA-HAK, HEA-NED ve THGA-NED algoritma-model çiftlerinin sonuçları ve hızları karşılaştırmalı olarak analiz edilecektir. Bir önceki bölümde sunulan istatistiksel analizlerde, NED modelin hassasiyet bakımından HAK ve ÇFAM modellerine göre daha iyi performansa sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Diğer taraftan, oluşturulma ve uygulamada en pratik olan modelin HAK olduğu literatür taramasında sunulanlardan açıkça görülmektedir. Dolayısıyla, algoritma-model çiftleri arasında yapılacak karşılaştırmalı analizlerde, NED ve HAK modelleri dikkate alınmış ve ÇFAM modeli bu analizlere dahil edilmemiştir.

Harmonik yük akışı gerçekleştirilecek sistem olarak IEEE 33 baralı test sistemi seçilmiştir. Bu sistemde, harmonik bozulmanın kayda değer seviyelerde olması için 14 ve 25 nolu baralara doğrusal olmayan (harmonik üreten yükler; HÜY) yerleştirilmiştir. Ayrıca, yine aynı amaçla; harmonik bozulmayı arttırıcı etkisi olan kondansatör bankaları 6, 11, 16, 19, 23 ve 30 nolu baralara bağlanmıştır. Bu kondansatör bankalarının hepsi 0.3 MVAR gücünde seçilmiştir. Ayrıca, modellenen FDÜB’lerin temel frekans güç faktörlerinin 1 olduğu diğer bir deyişle şebeke frekansında sadece aktif güç ürettikleri belirtilmelidir.

Sistemde yer alan HÜY’lere ait HAK ve NED modelleri, [48] ve [87] referans numaralı çalışmalardan alınmıştır. FDÜB’e ait HAK ve NED harmonik modelleri ise bu tez kapsamında yapılan çalışmalarda oluşturulan ve bir önceki bölümde hassasiyet analizlerinde dikkate alınan modellerdir. Modellerin verileri, sırasıyla HÜY için EK F’ de ve FDÜB’ler için EK G’de verilmiştir. IEEE 33 baralı test sisteminde bulunan yüklerin aktif (P_L) ve reaktif (Q_L) güçleri Tablo 4.1’de sunulmuştur. Ayrıca, test sisteminin hat verileri ekler kısmında Tablo E.1’de verilmiştir. Karşılaştırmalı analizler sırasında, üç farklı senaryo için sonuçlar elde edilmiş ve yorumlanmıştır. Bu senaryolar;

- **Senaryo 1:** Sistemde FDÜB olmadığı durum,
- **Senaryo 2:** Sistemde 18 nolu baraya bağlı 4 MW gücünde FDÜB’ün var olduğu durum,
- **Senaryo 3:** Sistemde 0.8 MW güçlere sahip 5 tane özdeş FDÜB’ün aday

baralara (8, 18, 21, 29 ve 33 nolu baralara) yerleştirildiği durum, olarak seçilmiştir.



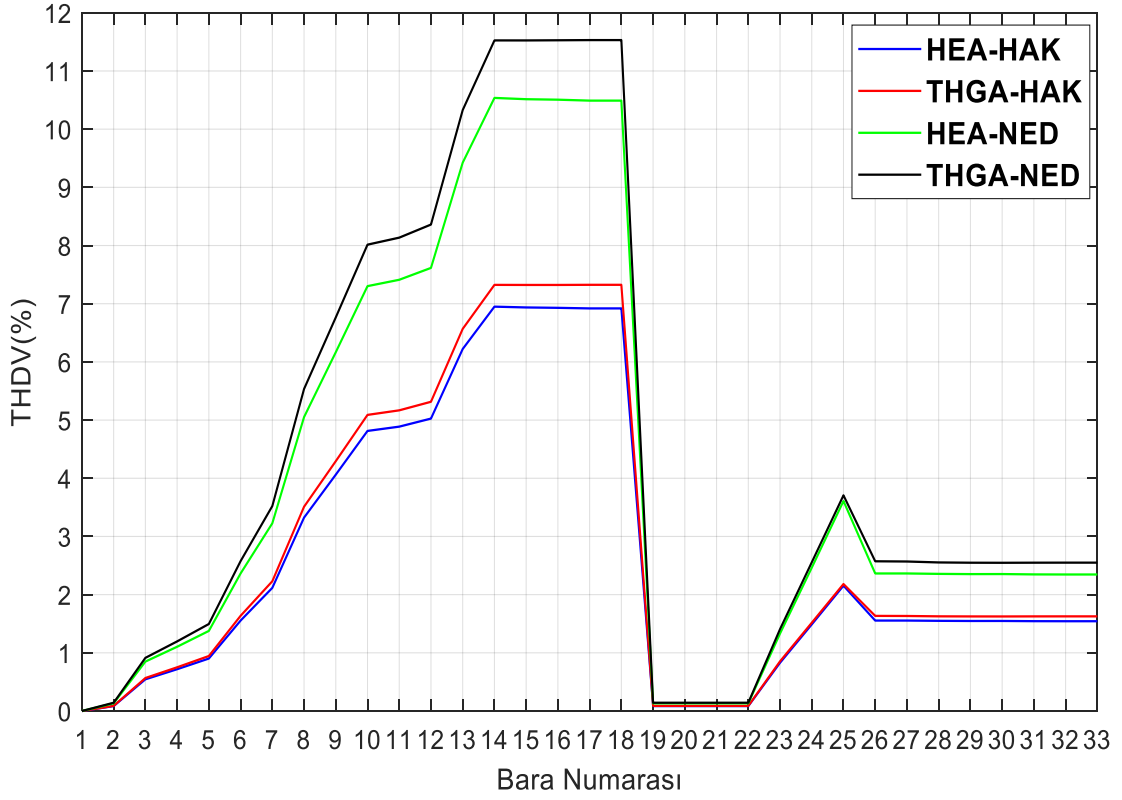
Şekil 4.1: IEEE 33 baralı test sistemi tek hat diyagramı.

Tablo 4.1: Güncellenmiş IEEE 33 baralı test sisteminin baralara bağlı yüklerin aktif ve reaktif güçleri.

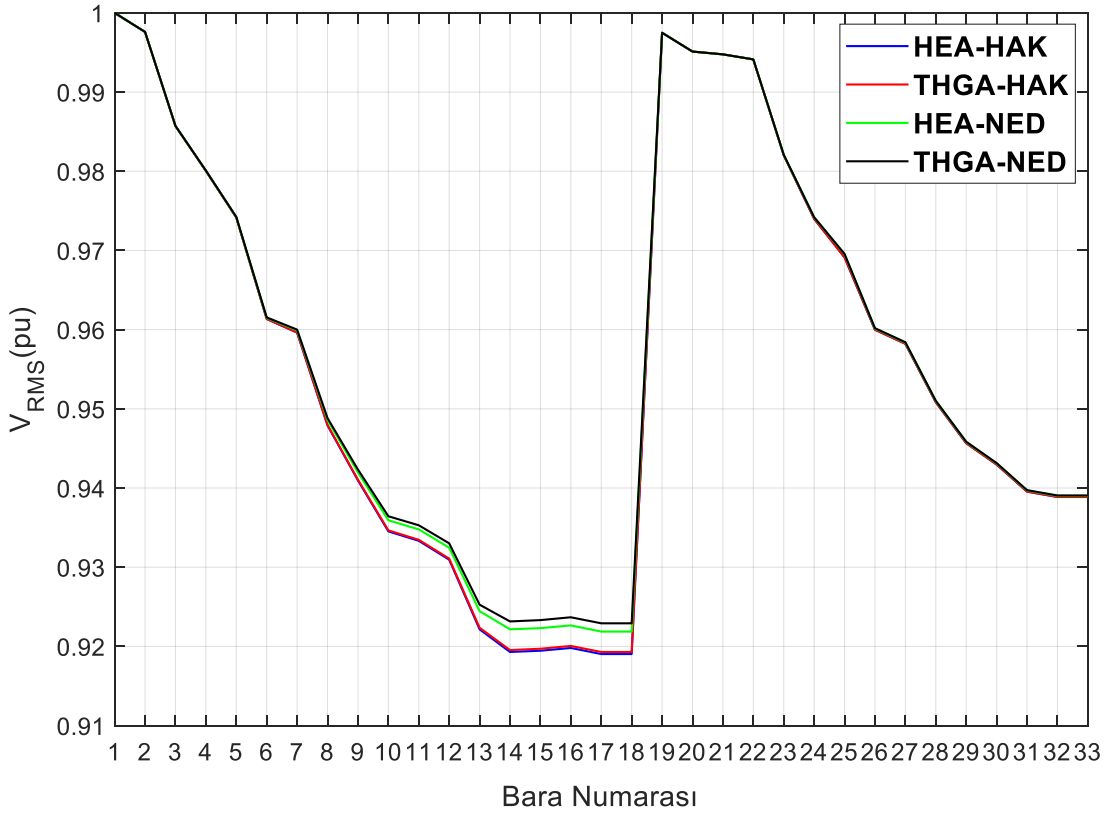
| Bara No | P_L (MW) | Q_L (MVar) | Bara No | P_L (MW) | Q_L (MVar) |
|---------|------------|--------------|---------|------------|--------------|
| 2 | 0.10000 | 0.06000 | 18 | - | - |
| 3 | 0.09000 | 0.04000 | 19 | 0.09000 | 0.04000 |
| 4 | - | - | 20 | 0.09000 | 0.04000 |
| 5 | 0.06000 | 0.03000 | 21 | - | - |
| 6 | 0.06000 | 0.02000 | 22 | 0.09000 | 0.04000 |
| 7 | 0.20000 | 0.10000 | 23 | 0.19000 | 0.15000 |
| 8 | - | - | 24 | 0.42000 | 0.15000 |
| 9 | 0.06000 | 0.02000 | 25 | 0.51000 | 0.22500 |
| 10 | 0.06000 | 0.02000 | 26 | 0.06000 | 0.02500 |
| 11 | 0.04500 | 0.03000 | 27 | 0.06000 | 0.02500 |
| 12 | 0.06000 | 0.03500 | 28 | 0.06000 | 0.02000 |
| 13 | 0.16000 | 0.13500 | 29 | - | - |
| 14 | 0.51000 | 0.22500 | 30 | 0.20000 | 0.60000 |
| 15 | 0.06000 | 0.01000 | 31 | 0.15000 | 0.07000 |
| 16 | 0.06000 | 0.02000 | 32 | 0.21000 | 0.10000 |
| 17 | 0.06000 | 0.02000 | 33 | - | - |

4.1 Senaryo 1 için Analiz Sonuçları

FDÜB'lerin test sistemine etkilerini gözlemlemek amacıyla ilk önce sistemde hiçbir FDÜB olmadığı durum incelenmiştir. Senaryo 1 gereği sistemimizde hiçbir FDÜB barınmadığı, sadece HÜY'lerin, doğrusal yüklerin ve sabit kondansatör bankalarının olduğu durumda sistemin, HEA-HAK, THGA-HAK, HEA-NED ve THGA-NED algoritma-model çiftlerine ait bara THDV değerleri ile bara gerilimi toplam etkin değerleri (V_{RMS} (pu)) sırasıyla Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'de sunulmuştur.



Şekil 4.2: Senaryo 1 için algoritma-model çiftlerine ait bara THDV değerleri.



Şekil 4.3: Senaryo 1 için algoritma-model çiftlerine ait bara V_{RMS} değerleri.

Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'den;

- (i) THDV eğrilerinin tepe yaptığı baraların HÜY'lerin bulunduğu 14 ve 25'inci baralarda olduğu,
- (ii) THDV eğrilerinin maksimum değerleri ve bu değerlere ulaştıkları bara numaralarının, HEA-HAK için %6.95 ve 14, THGA-HAK için %7.33 ve 14, HEA-NED için %10.54 ve 14 ve THGA-NED için %11.54 ve 14 olduğu,
- (iii) En pratik olan dolayısıyla literatürde en yaygın kullanılan algoritma-model çifti olan HEA-HAK ile karşılaştırıldığında, THGA-HAK'ın %0.38 (7.33-6.95), HEA-NED'in %3.59 (10.54-6.95) ve THGA-NED'in ise %4.59 (11.54-6.95) daha fazla maksimum THDV değeri hesapladığı,
- (iv) Tüm algoritma-model çiftleri için V_{RMS} eğrilerinin aynı trendi izlediği ve birbirlerine çok yakın değerlerde olduğu,
- (v) V_{RMS} eğrilerinin en düşük değerlerini 18 nolu barada aldığı; bu en düşük V_{RMS} değerlerinin HEA-HAK için 0.9190 pu, THGA-HAK için 0.9193 pu, HEA-NED için 0.9219 pu ve THGA-NED için 0.9229 pu olduğu,

görülmüştür.

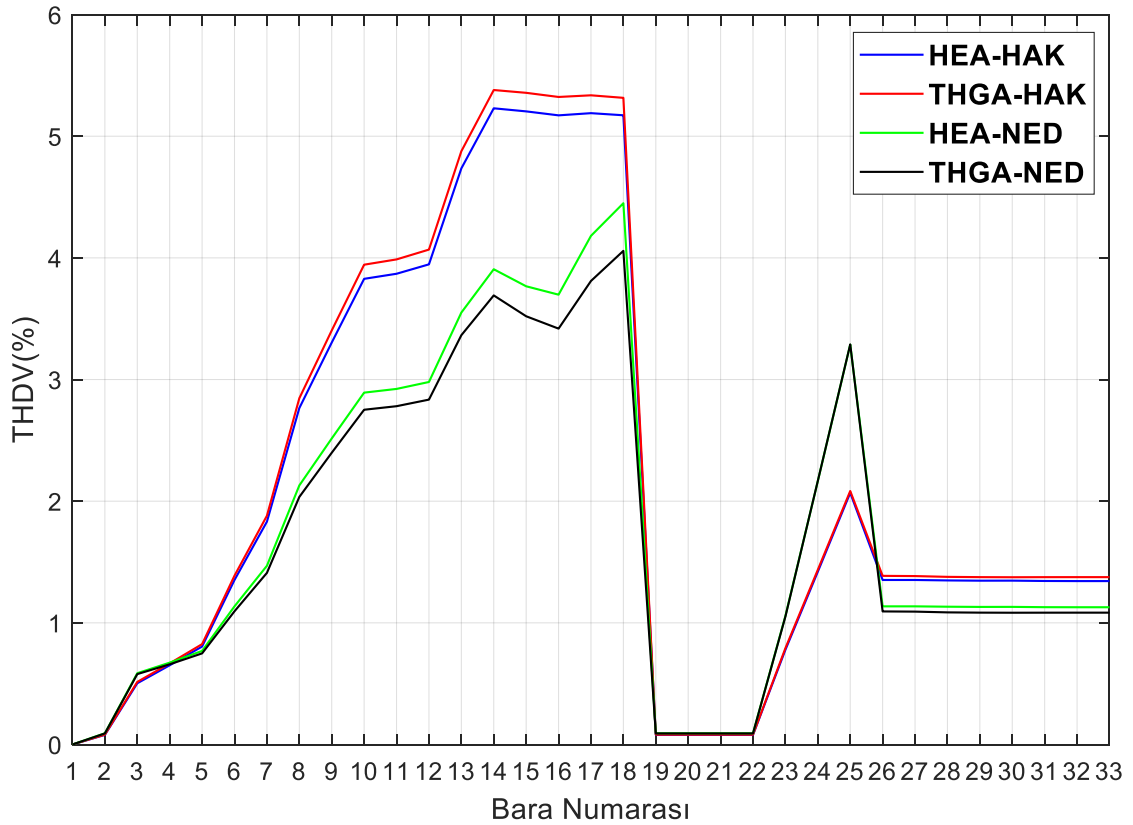
Ek olarak, Senaryo 1 için HEA-HAK, THGA-HAK, HEA-NED ve THGA-NED algoritma-model çiftlerinin çözüme ulaştıkları iterasyon sayıları ve çalışma süreleri Tablo 4.2'de verilmiştir. Bu tablodan, Senaryo 1 için bütün algoritmaların çözüme ulaştıkları iterasyon sayılarının 5 olduğu, çalışma sürelerinin ise HEA-HAK, THGA-HAK, HEA-NED ve THGA-NED için sırasıyla 0.0869, 0.1484, 0.1183 ve 0.1770 saniye olduğu görülmektedir. Algoritma-model çiftlerinin çözüme ulaştıkları iterasyon sayısının aynı olması, HEA ve THGA algoritmalarında sırasıyla durma kriterleri olan bara gerilimlerinin temel harmonik rms değerleri ve bara gerilimlerinin toplam rms değerlerinin iterasyonlar sırasında birbirine yakın değerler alması olarak yorumlanmıştır. Bununla birlikte, algoritma-model çiftlerinin karmaşıklık (gerektirdikleri işlem sayıları) farklı olması sebebiyle çözüme ulaşma süreleri birbirinden farklıdır. Buna göre, en kısa sürede çözüme ulaşan algoritma-model çifti en basit yapıya sahip olan HEA-HAK, en uzun sürede çözüme ulaşan algoritma-model çifti ise en karmaşık yapıya sahip olan THGA-NED'dir.

Tablo 4.2: Senaryo 1 için algoritma-model çiftlerine ait iterasyon sayıları ve çalışma süreleri.

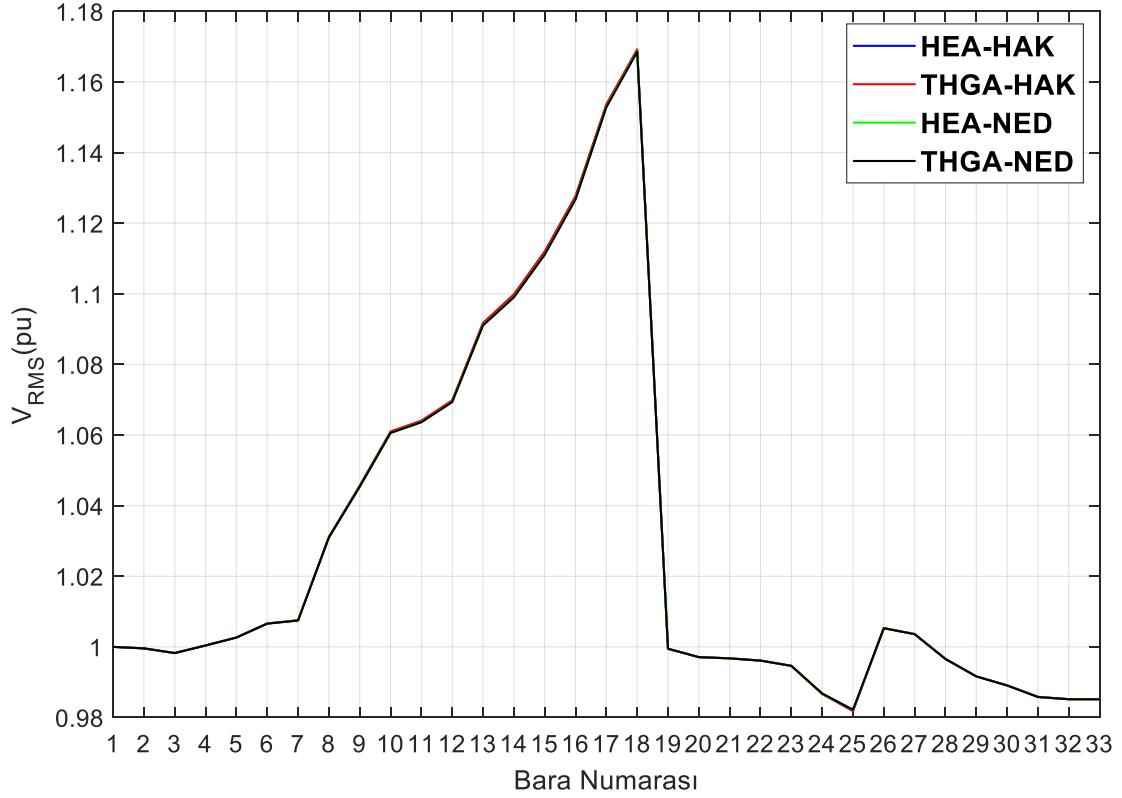
| | İterasyon Sayısı | Çalışma Süresi (saniye) |
|----------|------------------|-------------------------|
| HEA-HAK | 5 | 0.0869 |
| THGA-HAK | 5 | 0.1484 |
| HEA-NED | 5 | 0.1183 |
| THGA-NED | 5 | 0.1770 |

4.2 Senaryo 2 için Analiz Sonuçları

Tek ve yüksek güçte bir FDÜB'ün test sistemine etkisini görmek amacıyla, senaryo 2'de bir adet 4 MW gücünde FDÜB 18 nolu baraaya yerleştirilmiştir. Bu senaryo için, HEA-HAK, THGA-HAK, HEA-NED ve THGA-NED algoritma-model çiftlerine ait bara THDV değerleri ile bara V_{RMS} (pu) değerleri sırasıyla Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'de sunulmuştur.



Şekil 4.4: Senaryo 2 için algoritma-model çiftlerine ait bara THDV değerleri.



Şekil 4.5: Senaryo 2 için algoritma-model çiftlerine ait bara V_{RMS} değerleri.

Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'den,

- (i) THDV eğrilerinin tepe yaptığı baraların HÜY'lerin bulunduğu 14 ve 25'inci baralar ile FDÜB'ün bulunduğu 18'inci bara olduğu,
- (ii) THDV eğrilerinin maksimum değeri ve bu değerlere ulaştıkları bara numaralarının, HEA-HAK için 5.23 ve 14, THGA-HAK için %5.38 ve 14, HEA-NED için %4.45 ve 18, THGA-NED için %4.05 ve 18 olduğu,
- (iii) HEA-HAK ile karşılaştırıldığında, THGA-HAK'ın %0.15 (5.38-5.23) daha büyük maksimum THDV değeri hesapladığı, HEA-NED ve THGDA-NED'in ise sırasıyla %0.78 (5.23-4.45) ve %1.18 (5.23-4.05) daha az maksimum THDV değeri hesapladığı,
- (iv) Tüm algoritma-model çiftleri için V_{RMS} eğrilerinin senaryo 1'de olduğu üzere, aynı trendi izledikleri ve birbirlerine çok yakın değerlerde oldukları,
- (v) En yüksek V_{RMS} değerinin 1.17 pu ve 18 nolu barada (FDÜB'ün yerleştirildiği barada) olduğu,
- (vi) Baralarda gözlemlenen en yüksek ve en düşük V_{RMS} değerleri arasındaki farkın 0.19 pu olduğu,

ifade edilebilir.

Tablo 4.3'den ise Senaryo 2 için bütün algoritmaların çözüme ulaştıkları iterasyon sayılarının 9 olduğu, çalışma sürelerinin ise HEA-HAK, THGA-HAK, HEA-NED ve THGA-NED için sırasıyla 0.1024, 0.2099, 0.1439 ve 0.2565 saniye olduğu görülmektedir.

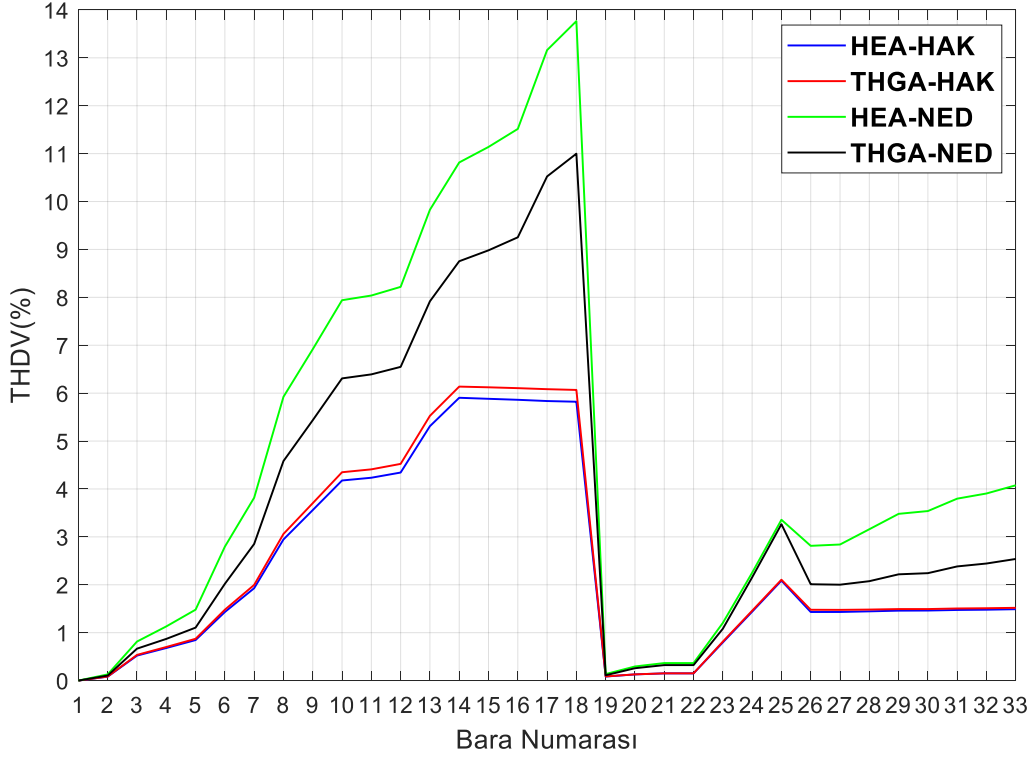
Tablo 4.3: Senaryo 2 için algoritma-model çiftlerine ait iterasyon sayıları ve çalışma süreleri.

| | İterasyon Sayısı | Çalışma Süresi (saniye) |
|----------|------------------|-------------------------|
| HEA-HAK | 9 | 0.1024 |
| THGA-HAK | 9 | 0.2099 |
| HEA-NED | 9 | 0.1439 |
| THGA-NED | 9 | 0.2565 |

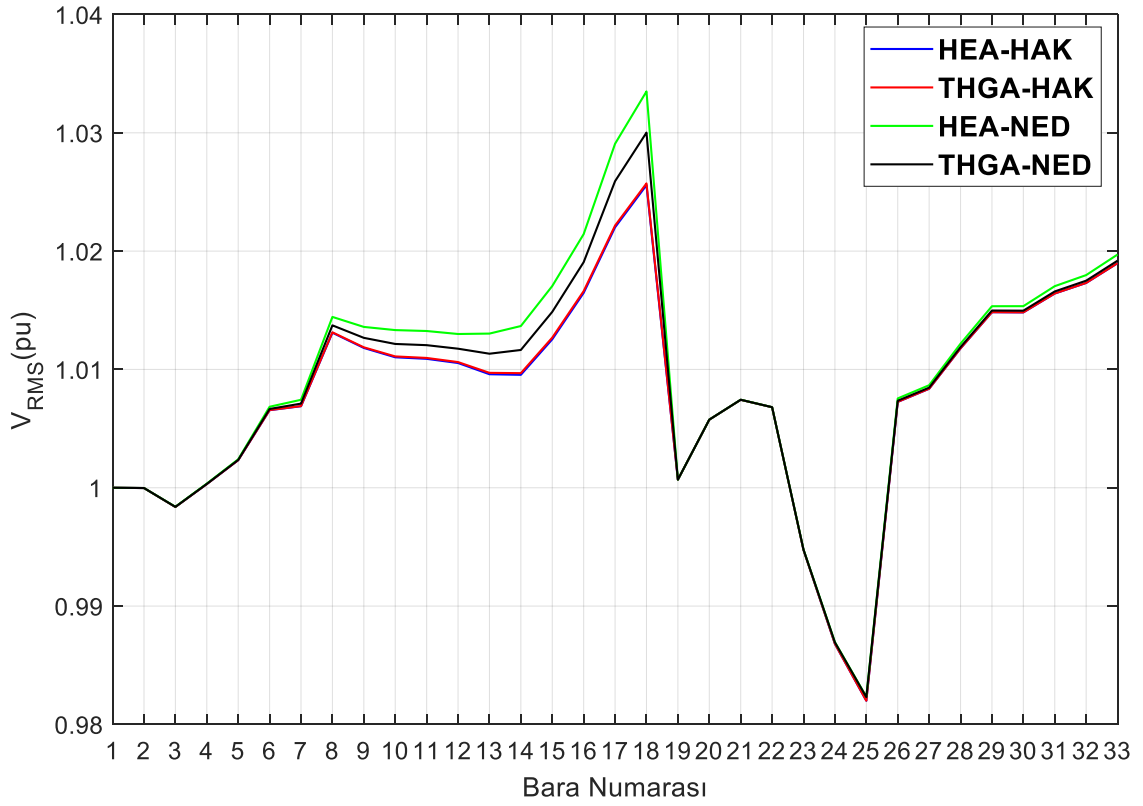
4.3 Senaryo 3 için Analiz Sonuçları

Senaryo 3'de 18 nolu baraya bağlı 4 MW gücünde FDÜB yerine aday baralara (8, 18, 21, 29 ve 33 nolu baralara) toplamda aynı güçte olacak şekilde özdeş (her biri 0.8 MW güç değerinde) 5 adet FDÜB yerleştirilmiştir.

Bu senaryo için elde edilen sonuçlar, FDÜB'lerin sistemin çeşitli noktalarına dağıtıldığı durumda, algoritma-model çiftlerinin karşılaştırmalı analizine imkan verecektir. Senaryo 3 için HEA-HAK, THGA-HAK, HEA-NED ve THGA-NED algoritma-model çiftlerine ait bara THDV değerleri ile bara V_{RMS} (pu) değerleri sırasıyla Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'de sunulmuştur.



Şekil 4.6: Senaryo 3 için algoritma-model çiftlerine ait bara THDV değerleri.



Şekil 4.7: Senaryo 3 için algoritma-model çiftlerine ait bara V_{RMS} değerleri.

Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'den,

- (i) THDV eğrilerinin maksimum değerleri ve bu değerlere ulaştıkları bara numaralarının, HEA-HAK için %5.90 ve 14, THGA-HAK için %6.14 ve 14, HEA-NED için %13.77 ve 18 ve THGA-NED için %10.99 ve 18 olduğu,
- (ii) HEA-HAK ile karşılaştırıldığında, THGA-HAK'ın %0.24 (6.14-5.90), HEA-NED'in %7.87 (13.77-5.90) ve THGA-NED'in ise %5.09 (10.99-5.90) daha fazla maksimum THDV değeri hesapladığı,
- (iii) Tüm algoritma-model çiftleri için V_{RMS} eğrilerinin aynı trendi gösterdiği, gözlemlenen en yüksek ve en düşük V_{RMS} değerleri arasındaki farkın bütün algoritma-model çiftleri için 0.05 pu civarında olduğu,
- (iv) Senaryo 3'de gözlemlenen maksimum THDV değerlerinin senaryo 2'de gözlemlenen maksimum THDV değerlerine göre HEA-HAK, THGA-HAK, HEA-NED ve THGA-NED algoritma-model çiftleri için sırasıyla, %0.67 (5.90-5.23), %0.76 (6.14-5.38), %9.32 (13.77-4.45) ve %6.94 (10.99-4.05) değerlerinde artmış olduğu,
- (v) Senaryo 3'de gözlemlenen maksimum THDV değerlerinin senaryo 1'de gözlemlenen maksimum THDV değerlerine göre HEA-HAK, THGA-HAK ve THGA-NED algoritma-model çiftleri için sırasıyla, -%1.05 (5.90-6.95), -%1.19 (6.14-7.33), %3.23 (13.77-10.54) ve -%0.55 (10.99-11.54) değerlerinde değişim gösterdiği,
- (vi) Üç senaryo için de elde edilen THDV eğrilerinin değişim trendlerinin (eğilimlerinin) önemli ölçüde dikkate alınan modelden etkilendiği,

belirtilmelidir.

Senaryo 3 ve 2 karşılaştırıldığında, test sisteminde çok noktaya FDÜB yerleştirilmesi durumunda tek noktadan FDÜB yerleştirildiği duruma göre THDV seviyesinin yükseldiği görülmektedir. Bunun sebebi olarak; FDÜB'lerin dağıtıldığı yerlere yakın baralarda harmonik bozulmayı artırıcı etkisi olan kondansatör gruplarının bulunması değerlendirilmiştir. Diğer taraftan, beklendiği gibi çok sayıda FDÜB olduğu durumda en yüksek ve en düşük bara gerilimi rms değerleri arasındaki fark tek FDÜB durumundakine göre daha küçülmüştür.

Bu hususlara ek olarak, Tablo 4.4’den Senaryo 3 için bütün algoritmaların çözüme ulaştıkları iterasyon sayılarının 4 olduğu, çalışma sürelerinin ise HEA-HAK, THGA-HAK, HEA-NED ve THGA-NED için sırasıyla 0.0810, 0.1278, 0.1057 ve 0.1661 saniye olduğu görülmektedir.

Tablo 4.4: Senaryo 3 için algoritma-model çiftlerine ait iterasyon sayıları ve çalışma süreleri.

| | İterasyon Sayısı | Çalışma Süresi (saniye) |
|----------|------------------|-------------------------|
| HEA-HAK | 4 | 0.0810 |
| THGA-HAK | 4 | 0.1278 |
| HEA-NED | 4 | 0.1057 |
| THGA-NED | 4 | 0.1661 |

4.4 Sonuç

Bu bölümde, IEEE 33 baralı test sisteminde çeşitli FDÜB senaryoları için HEA-HAK, THGA-HAK, HEA-NED ve THGA-NED algoritma-model çiftlerinin sonuçları ve hızları karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Bu analizler neticesinde,

- Algoritma-model çifti seçiminin baralara ait hesaplanan THDV değerlerinde önemli farklılıklara yol açtığı diğer bir ifadeyle harmonik analiz sonucuna önemli derecede etki ettiği,
- Hesaplanan bara THDV eğrilerinin gerek trendleri gerekse değerleri gözönüne alındığında modellerin algoritmalara göre sonuca daha fazla etki ettiği,
- Tüm algoritma-model çiftleri için V_{RMS} eğrilerinin aynı trendi gösterdiği,
- Aynı toplam güç değerinde olmasına rağmen farklı baralara dağıtılmış FDÜB'lerin THDV üzerinde dikkate değer farklara yol açtığı, bir başka ifadeyle sistemin THDV profili üzerinde FDÜB'lerin gücünün yanı sıra yerleşim yerlerinin de etkisinin olduğu,
- Algoritma-model çiftlerinin, çözüme ulaştıkları çalışma süresinin uzunluğuna göre en kısıdan en uzuna doğru, HEA-HAK, HEA-NED, THGA-HAK ve THGA-NED olarak sıralandığı, diğer taraftan algoritmaların çözüme ulaştıkları iterasyon sayılarının incelenen senaryolar için aynı olduğu,

çıktılarına ulaşılmıştır.

5. HARMONİK KİRLİLİĞE SAHİP GÜÇ SİSTEMLERİ İÇİN OPTİMAL FDÜB VE PF PLANLAMA YAKLAŞIMLARI

Bir önceki bölümde, algoritma-model çiftlerinin (HEA-HAK, HEA-NED, THGA-HAK ve THGA-NED) doğrusal yükler, HÜY'ler, FDÜB'ler ve sabit kondansatör bankalarının bulunduğu IEEE 33 baralı test sistemi için THDV, V_{RMS} ve çözüm hızları bakımından karşılaştırmalı analizleri üç farklı senaryo için yapılmıştı.

Bu analizler, aynı toplam güç değerinde ancak farklı baralara yerleştirilmiş FDÜB'lerin bara THDV seviyelerinde önemli farklılıklara yol açtığını göstermiştir. Bu sonucu destekler doğrultuda, literatürdeki bazı çalışmalarda [88], [89] THDV minimizasyonu harmonikli sistemlerde optimal dağıtık üretim birimi planlama problemlerinin amaç fonksiyonlarında dikkate alınmıştır. Ayrıca, yine literatürdeki optimal pasif filtre (PF) planlama yaklaşımlarının geleneksel amaç fonksiyonlarından birinin THDV minimizasyonu olduğu [12], [35], [44] çalışmalarında belirtilmiştir. Dolayısıyla, bu tez kapsamında, öncelikle harmonikli sistemler için optimal FDÜB ve PF boyutlandırma ve yerleştirme probleminin amaç fonksiyonu olarak THDV minimizasyonu ele alınmıştır. Bu optimal planlama yaklaşımı, PF ve FDÜB'ün sistemdeki gerilim harmonik bozulmasının azami oranda iyileştirilmesi için birlikte kullanımını hedeflemektedir.

Diğer taraftan, güç sistemlerinin harmonik kısıtlı FDÜB barındırma kapasitesini maksimize etmek amacıyla optimal PF boyutlandırma problemi, Sakar ve arkadaşları tarafından [12], [13]'de iki baralı tipik bir dağıtım sistemi için çözülmüştür. Bahsedilen iki çalışma dikkate alınarak, bu tez kapsamında, ikinci olarak, optimal FDÜB ve PF boyutlandırma ve yerleştirme problemi; sistemin FDÜB barındırma kapasitesinin (BK) maksimizasyonunu, en yüksek bara THDV değerinin minimizasyonunu ve bara gerilimlerinin rms sapma (VD) değerinin minimizasyonunu amaçlayacak şekilde çok amaçlı olarak önerilmiştir. Böylece, gerilim harmonik bozulmasını minimize etmek, bara gerilimlerini 1 pu seviyesine azami olarak yaklaştırmak ve BK'yı maksimize etmek için bir optimal FDÜB ve PF planlaması hedeflenmiştir.

Her iki optimal FDÜB ve PF planlama yaklaşımında,

- Bara gerilimlerinin istenilen aralıkta tutulabilmesi için bara gerilimi alt ve üst sınırlarının tanımlanması,

- IEEE 519 standardına uygunluk sağlanması için bara gerilimlerine ait toplam ve her bir harmonik bozulma değerlerinin aynı standartta izin verilen maksimum değerleri aşmayacak şekilde sınırlandırılması,
- Sistemdeki toplam yük gücünden daha fazla üretim yapılarak kaynak tarafının beslenmesi ve ters güç akışına engel olmak için FDÜB'lere ait toplam gücün sistemdeki toplam yük gücünü geçmeyecek şekilde sınırlandırılması,
- Sistemde aşırı kompanzasyonu önlemek için PF'lerin toplam kapasitif reaktif gücünün sınırlandırılması,
- Ve sisteme yerleştirilecek FDÜB ve PF sayılarının sınırlandırılması,

kısıtlar olarak dikkate alınmıştır.

Yukarıda belirtilenler ışığında, bu bölümde (i) THDV minimizasyonu temelli ve (ii) gerilim profilini ve FDÜB barındırma kapasitesini en iyileştirme temelli yaklaşımların sonuçlarının IEEE 33 baralı test sistemi için yorumlanması amaçlanmıştır. Ayrıca, algoritma-model çifti tercihinin, her iki optimal planlama yaklaşımının sonucuna etkisinin analiz edilmesi, yine bu bölümde sunulan çalışmaların diğer bir motivasyonudur.

Optimizasyon problemlerinin çözümünde Balina optimizasyon algoritması kullanılmıştır. Sonuçlar IEEE 33 baralı test sisteminde iki farklı senaryo için elde edilmiştir. Analizlerde, 2,8 GHz Intel Core i7 işlemcili, 16 GB 2133 MHz LPDDR3 bellek içeren MacOS işletim sistemine sahip bilgisayar kullanılmıştır. Bütün algoritmalar 30 kez tekrar edilerek optimal sonucu garanti altına almak için ardışık olarak çözdürülmüştür.

5.1 THDV Minimizasyonu Temelli Yaklaşım

Bara gerilimlerinin rms değerinin istenilen aralığını, IEEE 519 standardında tanımlı gerilime ait toplam ve her bir harmonik sınır değerlerini, FDÜB sayısını, PF sayısını, FDÜB gücünü ve PF'lerin toplam kapasitif reaktif güç değerini kısıt olarak kabul eden, baralarda gözlemlenen en yüksek THDV'nin minimizasyonunu amaçlayan optimal PF ve FDÜB planlama yaklaşımı için problem ifadesi aşağıda verilmiştir:

Amaç Fonksiyonu:

$$\text{Min } THDV_M (h_{t1}, \dots, h_{tn}, Q_{PF1}, \dots, Q_{PFn}, BN_{PF1}, \dots, BN_{PFn}, P_{FV1}, \dots, P_{FVm}, BN_{FV1}, \dots, BN_{FVm}) \quad (5.1)$$

Kısıtlar:

$$0.9pu \leq V_{RMS,i} = \sqrt{\sum_{h \geq 1} (V_i^h)^2} \leq 1.1pu \quad (5.2)$$

$$THDV_i(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h \geq 1} (V_i^h)^2}}{V_i^1} \cdot 100 \leq THDV_{Maks}(\%) \quad (5.3)$$

$$IHDV_i(\%) = \frac{V_i^h}{V_i^1} \cdot 100 \leq IHDV_{Maks}(\%) \quad (5.4)$$

$$m \leq N_{FV} \quad (5.5)$$

$$n \leq N_{PF} \quad (5.6)$$

$$\sum_m P_{FVm} \leq \sum_i S_{Li} \quad (5.7)$$

$$\sum_n Q_{PFn} \leq \sum_i Q_{Li} - \sum_i Q_{Ci} \quad (5.8)$$

Yukarıda sunulan denklemlerde, h_{tn} , Q_{PFn} ve BN_{PFn} n. tek ayarlı PF'nin sırasıyla ayarlandığı harmonik numarası, temel frekans reaktif gücü ve yerleştirildiği bara numarası, P_{FVm} ve BN_{FVm} m. FDÜB'ün sırasıyla gücü ve yerleştirildiği bara numarası, S_{Li} i. baraya bağlı yükün temel frekans görünür gücü, N_{FV} maksimum FDÜB sayısı ve N_{PF} maksimum PF sayısıdır. $IHDV_{Maks}$ ve $THDV_{Maks}$ ise her bir harmonik gerilimi ve toplam gerilim harmonik bozulma indisi için IEEE 519 standardında tanımlı izin verilen maksimum değerler olup IEEE 33 baralı test sistemi için bu maksimum değerler sırasıyla %3 ve %5'dir.

5.2 Gerilim Profilini ve FDÜB Barındırma Kapasitesini En İyileştirme Temelli**Yaklaşım**

Sistemin FDÜB barındırma kapasitesinin (BK) maksimize edilmesini, baralarda gözlemlenen en yüksek toplam gerilim harmonik bozulma değerinin ($THDV_M$) minimize edilmesini ve bara gerilimlerinin rms sapma değerinin (VD) minimizasyonu amaçlayan optimal FDÜB ve PF planlama yaklaşımının problem ifadesi aşağıda sunulmuştur:

Amaç Fonksiyonu:

$$\text{Min}AF(h_{t1}, \dots, h_{tn}, Q_{PF1}, \dots, Q_{PFn}, BN_{PF1}, \dots, BN_{PFn}, P_{FV1}, \dots, P_{FVm}, BN_{FV1}, \dots, BN_{FVm}) = \left(m_1 THDV_M + m_2 VD + m_3 \frac{1}{BK} \right) \quad (5.9)$$

Kısıtlar:

Denklem (5.2)-(5.8) arasında verilen kısıtlardır.

Denklem (5.9)'da m_1 , m_2 ve m_3 değerleri ağırlık katsayıları olup bu katsayılar sırasıyla 0.0487, 0.234 ve 0.71727'dir. Bu katsayıların toplamı 1'e eşittir. Ayrıca, amaç fonksiyonunda yer alan BK ve VD indisleri, Denklem (5.10) ve (5.11)'de verilen ifadelerle hesaplanmıştır:

$$BK = \frac{\sum_m P_{FVm}}{\sum_i S_{Li}} \quad (5.10)$$

$$VD = \sqrt{\frac{1}{TBN} \sum_i (V_{RMS,i} - 1)^2} \quad (5.11)$$

Burada, TBN terimi sistemde var olan toplam bara sayısını ifade etmektedir

5.3 Balina Optimizasyon Algoritmasıyla Optimal FDÜB ve PF Planlama Probleminin Çözümü

Bu tez çalışmasında ele alınan optimal yerleştirme ve boyutlandırma problemlerinin çözümünde literatürde son zamanlarda önerilmiş Balina optimizasyon (BO) algoritması [90] dikkate alınmıştır. Balina Optimizasyon Algoritması (BO), kambur balinaların balık avlama davranışının modellenmesi sonucu elde edilmiş bir üst sezgisel optimizasyon algoritmasıdır.

BO algoritması, kambur balinaların avlanma davranışını 3 farklı kısımda modellemiştir. Buna göre birinci kısım avın tespiti ve etrafını sarma, ikinci kısım ava doğru hareket ve üçüncü kısım ise yeni avların arandığı kısımdır.

5.3.1 Avın Kuşatılması

Kambur balinalar avlarının yerini belirleyip hava kabarcıklarını kullanarak avın bulunduğu konuma yaklaşabilirler. BO algoritmasında, en iyi çözümün yeri tam olarak bilinmediğinden avın bulunduğu konum veya etrafı, o andaki en iyi çözüm olarak kabul edilir. Buna göre, herhangi bir andaki en iyi uygunluk değerine sahip çözüm ajanın konumu kullanılarak diğer ajanların konumu, en iyi ajanın konumuna doğru güncellenir. Bu davranışın matematiksel modeli aşağıda verilen Denklem (5.12) ve Denklem (5.13)' de ifade edilmiştir.

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{X}^*(t) - \vec{X}(t)| \quad (5.12)$$

$$\vec{X}(t + 1) = \vec{X}^*(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (5.13)$$

Denklem (5.12) ve Denklem (5.13)'de kullanılan t iterasyon adımı, \vec{A} ve \vec{C} katsayı vektörleri, X^* içinde bulunan ana kadar elde edilen en iyi sonucun konum vektörü, \vec{X} konumu güncellenecek olan ajana ait konum vektörüdür. $\vec{X}(t + 1)$ ise avına doğru yönelen ajanın yeni konumunu ifade etmektedir. Burada en iyi sonucun konumunu veren X^* vektörü, eğer daha iyi bir sonuç bulunmuş ise her iterasyonda güncellenir.

\vec{A} ve \vec{C} katsayı vektörleri aşağıdaki ifadelerle hesaplanır:

$$\vec{A} = 2\vec{a} \cdot \vec{r} - \vec{a} \quad (5.14)$$

$$\vec{C} = 2 \cdot \vec{r} \quad (5.15)$$

Bu ifadelerde kullanılan \vec{a} , iterasyon boyunca 2'den 0'a doğrusal azalan vektörü, \vec{r} , [0,1] aralığında rasgele oluşturulan bir vektörü belirtmektedir.

5.3.2 Ava Yaklaşma Yöntemi

Bu kısımda, balinanın avına yaklaşma yöntemi çemberi daraltma ve spiral hareket olmak üzere iki şekilde modellenmiştir. Çemberi daraltma hareketi \vec{a} değerinin azaltılması ile sağlanmaktadır. \vec{a} değeri iterasyon boyunca 2'den 0'a doğrusal olarak azaltılmasından dolayı \vec{A} , $[-a, a]$ aralığında rasgele değerler alabilir. Rasgele değerler, $[-1, 1]$ aralığında oluşturulursa arama yapan ajanın yeni konumu orijinal yeri ile en iyi ajanın konumu arasında bulunur.

Spiral hareket için hedeflenen konum ile üzerinde işlem yapılan ajan arasındaki mesafe aşağıda verilmiştir:

$$\vec{X}(t + 1) = \vec{D}^l \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + \vec{X}^*(t) \quad (5.16)$$

$$\vec{D}^l = |\vec{X}^*(t) - \vec{X}(t)| \quad (5.17)$$

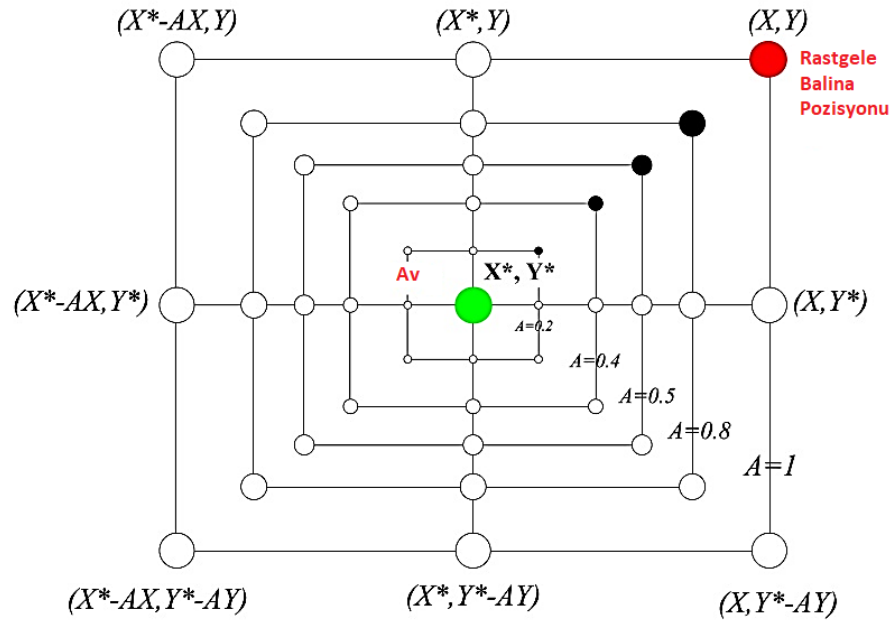
Bu ifadelerde, \vec{D}^l en iyi çözüm ile üzerinde işlem yapılan ajan arasındaki mesafe, b logaritmik spiral sabiti, l , $[-1, 1]$ aralığında rasgele sayı ve “.” eleman çarpımını ifade etmektedir. BO algoritmasında balinanın avına hangi yöntem ile yaklaşacağı %50 olasılık ile belirlenmektedir. Bunlar sırasıyla; Baloncuk ağı arama tekniği (bkz. Şekil 5.1) ve Spiral

olarak konum güncelleme (bkz. Şekil 5.2) tekniğidir. Buna göre üzerinde işlem yapılan balinanın yeni konumunu belirlemek için Denklem (5.16) kullanılır.

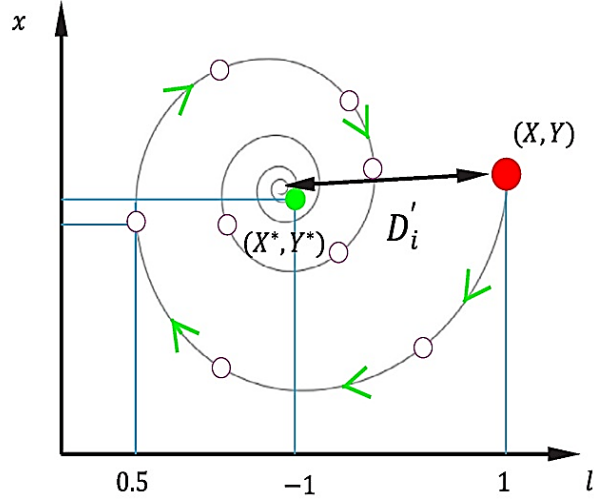
Burada, kambur balinaların aynı anda küçülen bir daire içerisinde ve spiral biçimli bir yol boyunca av çevresinde yüzdükleri belirtilmelidir. Bu sebeple bu iki yöntemden hangisinin kullanılacağını seçmek için aşağıdaki ifadeden yararlanılır:

$$\vec{X}(t+1) = \begin{cases} \vec{X}^*(t) - \vec{A} \cdot \vec{D}, & p < 0,5 \\ \vec{D}' \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + \vec{X}^*(t), & p \geq 0,5 \end{cases} \quad (5.18)$$

Denklem (5.18)'de kullanılan p , $[0, 1]$ aralığında üretilen rasgele bir sayıdır.



Şekil 5.1: Baloncuk ağı arama tekniği [90].



Şekil 5.2: Spiral olarak konum güncelleme [90].

5.3.3 Yeni Av Arama

\vec{A} '1' değerinden büyük veya '-1' den daha düşük rastgele değerlere sahip olan bir vektördür. Bu vektör, arama ajanlarının bir referans balinasından uzaklaşmasını zorunlu kılmaktadır. Böylece, avlanma süreci boyunca balinalar arasındaki etkileşimlerden kaçınılmaktadır. Çözüm adayının konumu, herhangi bir anda bulunan en iyi arama aracıya yerine rasgele seçilen bir arama ajanıyla güncellenir. Bu rasgeleliği sağlamak için; Denklem (5.12) ve Denklem (5.13)'de \vec{X}^* 'ı \vec{X}_{rand} olarak değiştirilerek güncellenir:

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{X}_{rand} - \vec{X}| \quad (5.19)$$

$$\vec{X}(t + 1) = \vec{X}_{rand} - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (5.20)$$

Burada \vec{X}_{rand} rasgele bir konum vektörünü (rasgele bir balınayı) belirtir. Bu prosedür, araştırmanın küreselleşmesi için kullanılır.

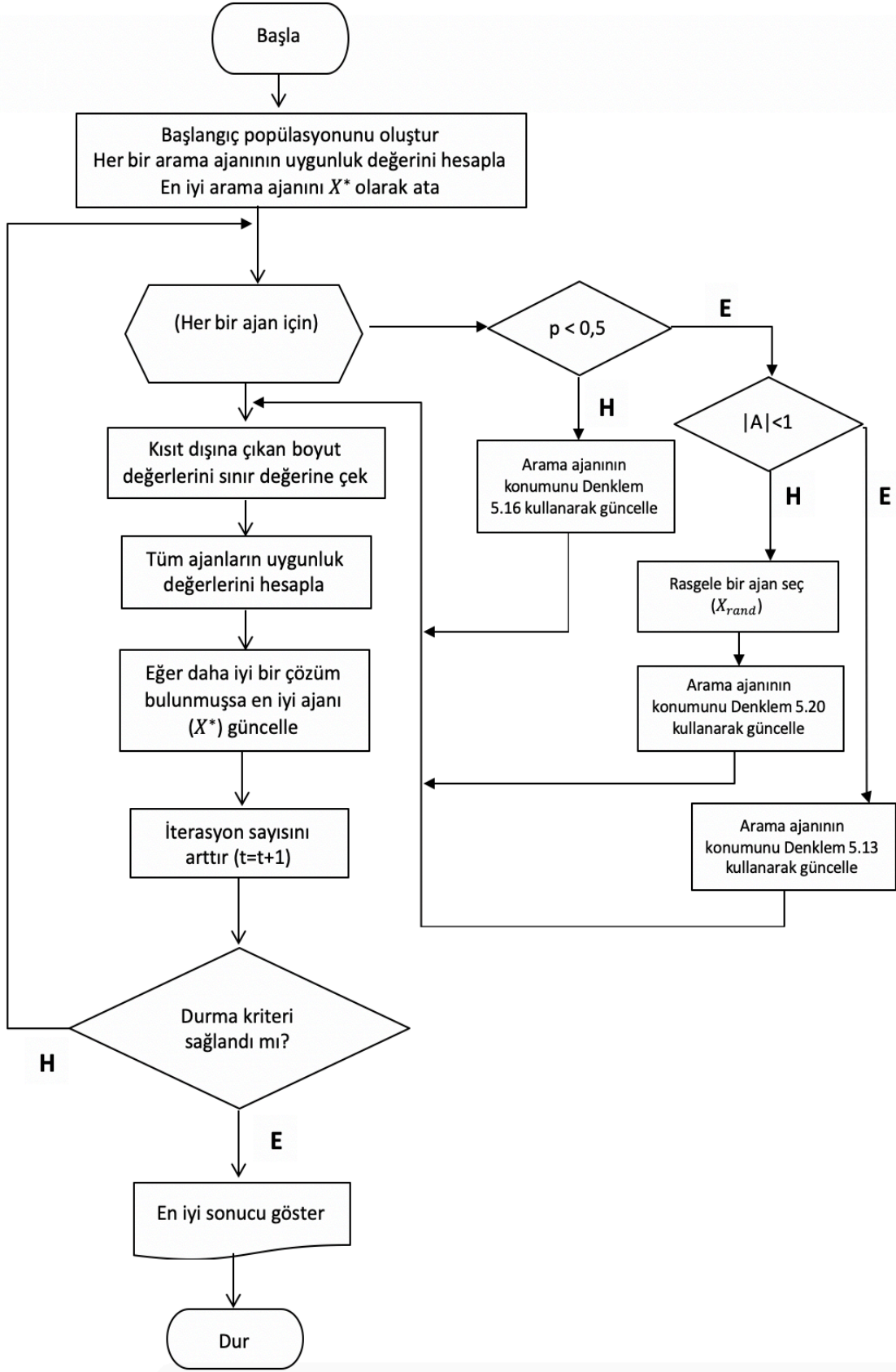
Yukarıda detaylı olarak açıklanan BO algoritmasına ait pseudo-code ve işlem basamaklarını gösteren akış diyagramı Şekil 5.3 ve Şekil 5.4'de verilmiştir.

```

Başlangıç popülasyonunu oluştur
Her bir arama ajanının uygunluk değerini hesapla
En iyi arama ajanını  $X^*$  olarak ata
while ( $t <$  maksimum iterasyon sayısı)
  for (her bir arama ajanı için)
     $a, A, C, l$  ve  $p$  değerlerini güncelle
    if ( $p < 0,5$ )
      if ( $|A| < 1$ )
        Arama ajanının konumunu Denklem (5.13) kullanarak güncelle
      else if ( $|A| \geq 1$ )
        Rasgele bir ajan seç ( $X_{rand}$ )
        Arama ajanının konumunu Denklem (5.20) kullanarak
        güncelle
      end
    else if ( $p \geq 0,5$ )
      Arama ajanının konumunu Denklem (5.16) kullanarak güncelle
    end
  end
Kısıt dışına çıkan boyut değerlerini sınır değerine çek
Tüm ajanların uygunluk değerlerini hesapla
Eğer daha iyi bir çözüm bulunmuşsa en iyi ajanı ( $X^*$ ) güncelle
İterasyon sayısını arttır ( $t=t+1$ )
end
en iyi ajanı ( $X^*$ ) yazdır

```

Şekil 5.3: BO algoritmasına ait pseudo-kod.



Şekil 5.4: Balina optimizasyon algoritmasının akış diyagramı.

5.4 THDV Minimizasyonu Temelli Yaklaşım için Analiz Sonuçları

Bu kısımda, IEEE 33 baralı test sisteminde iki farklı senaryo için FDÜB'ler ve PF'lerin optimal boyutlandırılması ve yerleştirilmesinde THDV minimizasyonu temelli yaklaşıma göre elde edilen sonuçlar sunulacaktır. Analizlerde HEA-HAK, HEA-NED, THGA-HAK ve THGA-NED algoritma-model çiftlerinin sonuca etkisi yorumlanacaktır. Analizler kapsamında dikkate alınan iki farklı senaryo sırasıyla,

- **Senaryo 4:** 3 tane FDÜB ve 3 tane PF'nin optimal boyutlandırılması ve yerleştirilmesi,
- **Senaryo 5:** 5 tane FDÜB ve 5 tane PF'nin optimal boyutlandırılması ve yerleştirilmesidir.

Her iki senaryoda FDÜB'lerin yerleştirilmesi için aday bara olarak 8, 18, 21, 29 ve 33 nolu baralar, PF'lerin yerleştirilmesi için aday bara olarak 6, 11, 16, 19, 23 ve 30 nolu baralar seçilmiştir. Analizlerde BO algoritması çözümün elde edilmesinde uygulanmıştır.

BO algoritması için çözüm adaylarının sayısı 400 ve maksimum iterasyon sayısı 50 alınmıştır. Senaryo 5 için ise çözüm adaylarının sayısı 600 ve maksimum iterasyon sayısı 50 alınmıştır. Bu parametre sayılarının belirlenmesinde çalışmalar sırasında elde edilen sonuçlar dikkate alınmıştır.

5.4.1 Senaryo 4 için Sonuçlar

Senaryo 4 için harmonik analizlerinde dört farklı algoritma-model çifti uygulanarak, THDV minimizasyonu temelli optimal planlama yaklaşımına göre elde edilen FDÜB baraları ve güçleri Tablo 5.1'de, PF baraları, PF temel frekans reaktif güçleri ve ayarlandıkları harmonik numaraları ise Tablo 5.2'de sunulmuştur.

Tablo 5.1: THDV minimizasyonu temelli optimal FDÜB ve PF planlama yaklaşımına ait problemin senaryo 4 için çözümü sonucu elde edilen FDÜB baraları ve güçleri.

| | | HEA-HAK | HEA-NED | THGA-HAK | THGA-NED |
|--------|----------------|---------|---------|----------|----------|
| FDÜB 1 | BN_{FV1} | 8 | 8 | 18 | 18 |
| | P_{FV1} (MW) | 1.367 | 1.263 | 1.081 | 1.081 |
| FDÜB 2 | BN_{FV2} | 18 | 21 | 29 | 21 |
| | P_{FV2} (MW) | 1.186 | 1.033 | 1.190 | 0.515 |
| FDÜB 3 | BN_{FV3} | 29 | 29 | 33 | 33 |
| | P_{FV3} (MW) | 1.275 | 1.421 | 1.120 | 2.088 |

Tablo 5.2: THDV minimizasyonu temelli optimal FDÜB ve PF planlama yaklaşımına ait problemin senaryo 4 için çözümü sonucu elde edilen PF baraları, temel frekans reaktif güçleri ve ayarlandıkları harmonik numaraları.

| | | HEA-HAK | HEA-NED | THGA-HAK | THGA-NED |
|------|-------------------------------|---------|---------|----------|----------|
| PF 1 | BN_{PF1} | 11 | 6 | 11 | 11 |
| | Q_{PF1} (MVA _r) | 0.045 | 0.215 | 0.096 | 0.010 |
| | h_{t1} | 5.02 | 7.97 | 5.05 | 7.01 |
| PF 2 | BN_{PF2} | 16 | 11 | 16 | 16 |
| | Q_{PF2} (MVA _r) | 0.391 | 0.005 | 0.317 | 0.081 |
| | h_{t2} | 12.03 | 7.00 | 10.06 | 12.66 |
| PF 3 | BN_{PF3} | 23 | 16 | 19 | 30 |
| | Q_{PF3} (MVA _r) | 0.014 | 0.093 | 0.028 | 0.108 |
| | h_{t3} | 6.5 | 14.25 | 15.10 | 13.59 |

Bu tablolardan, FDÜB'lerin; (i) HEA-HAK uygulandığında 8, 18 ve 29 nolu baralara yerleştirildiği ve güçlerinin sırasıyla 1.367, 1.186 ve 1.275 MW olduğu, (ii) HEA-NED uygulandığında 8, 21 ve 29 nolu baralara yerleştirildiği ve güçlerinin sırasıyla 1.263, 1.033 ve 1.421 MW olduğu, (iii) THGA-HAK uygulandığında 18, 29 ve 33 nolu baralara yerleştirildiği ve güçlerinin sırasıyla 1.081, 1.190 ve 1.120 MW olduğu ve (iv) THGA-NED uygulandığında 18, 21 ve 33 nolu baralara yerleştirildiği ve güçlerinin sırasıyla 1.081, 0.515 ve 2.088 MW olduğu görülmektedir.

Ayrıca, PF'lerin; (i) HEA-HAK uygulandığında 11, 16 ve 23 nolu baralara yerleştirildiği, temel frekans reaktif güçlerinin 0.045, 0.391 ve 0.014 MVA_r ve ayarlandıkları harmonik numaralarının 5.02, 12.03 ve 6.5 olduğu, (ii) HEA-NED uygulandığında 6, 11 ve 16 nolu baralara yerleştirildiği, temel frekans reaktif güçlerinin 0.215, 0.005 ve 0.093 MVA_r ve ayarlandıkları harmonik numaralarının 7.97, 7 ve 14.25 olduğu, (iii) THGA-HAK uygulandığında 11, 16 ve 19 nolu baralara yerleştirildiği, temel frekans reaktif güçlerinin 0.096, 0.317 ve 0.028 MVA_r ve ayarlandıkları harmonik numaralarının 5.05, 10.06 ve 15.1

olduğu, (iv) THGA-NED uygulandığında 11, 16 ve 30 nolu baralara yerleştirildiği, temel frekans reaktif güçlerinin 0.010, 0.081 ve 0.108 MVar ve ayarlandıkları harmonik numaralarının 7.01, 12.66 ve 13.59 olduğu çıktılarına ulaşılmıştır.

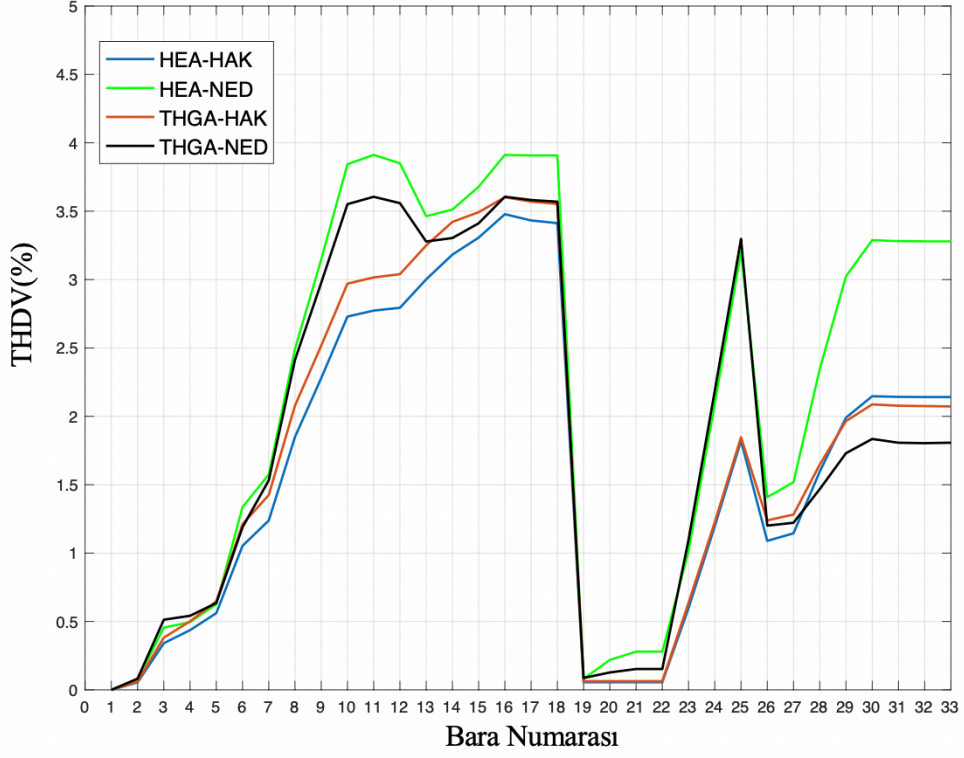
Senaryo 4 için elde edilen BK, THDV_M ve VD değerleri Tablo 5.3’de verilmiştir. Bu tablodan, BK, THDV_M ve VD değerlerinin uygulanan harmonik analiz metodolojisine göre sırasıyla, (i) HEA-HAK için 0.8815, 3.478 ve 0.0335, (ii) HEA-NED için 0.8560, 3.911 ve 0.0106, (iii) THGA-HAK için 0.7810, 3.602 ve 0.0257, (iv) THGA-NED için 0.8486, 3.605 ve 0.0205 olduğu ifade edilebilir.

Tablo 5.3: THDV minimizasyonu temelli optimal FDÜB ve PF planlama yaklaşımına ait problemin senaryo 4 için çözümü sonucu elde edilen BK, THDV_M ve VD değerleri.

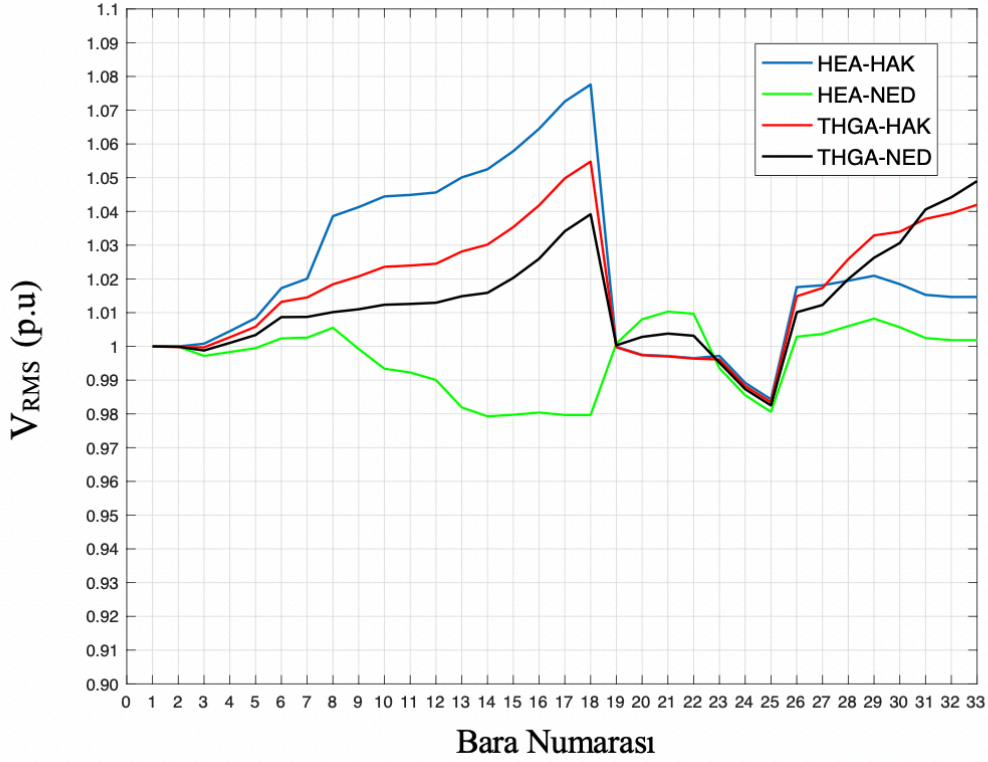
| | HEA-HAK | HEA-NED | THGA-HAK | THGA-NED |
|-----------------------|---------|---------|----------|----------|
| BK | 0.8815 | 0.8560 | 0.7810 | 0.8486 |
| THDV _M (%) | 3.478 | 3.911 | 3.602 | 3.605 |
| VD | 0.0335 | 0.0106 | 0.0257 | 0.0205 |

Senaryo 4 için THDV minimizasyon temelli optimal FDÜB ve PF planlama yaklaşımı uygulanarak elde edilen bara THDV ve V_{RMS} değerleri Şekil 5.5 ve Şekil 5.6’da verilmiştir.

Şekil 5.5’den THDV_M değerlerinin, bütün algoritma-model çiftlerine göre yapılan optimal planlamalar için 16 nolu barada meydana geldiği görülmektedir. Diğer taraftan, Şekil 5.6’da verilen sonuçlar ise; V_{RMS} değerlerinin HEA-HAK için 0.98 ile 1.08 pu, HEA-NED için 0.98 ile 1.01 pu, THGA-HAK için 0.98 ile 1.06 pu, THGA-NED için 0.98 ile 1.04 pu aralıklarında değiştiğini göstermektedir.

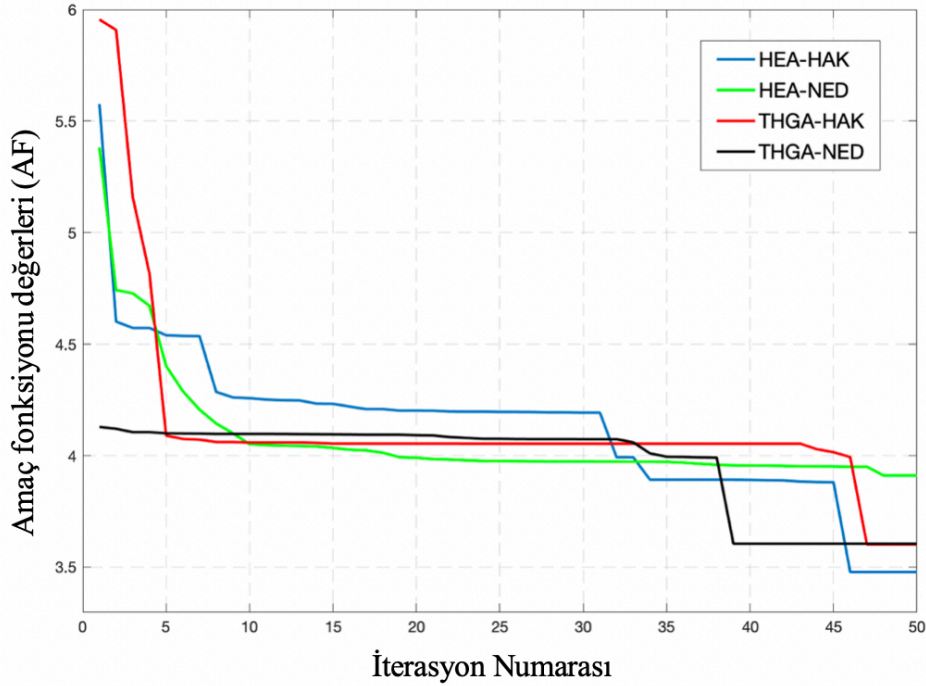


Şekil 5.5: THDV minimizasyonu temelli optimal FDÜB ve PF planlama yaklaşımına ait problemin senaryo 4 için çözümü sonucu elde edilen bara THDV değerleri.



Şekil 5.6: THDV minimizasyonu temelli optimal FDÜB ve PF planlama yaklaşımına ait problemin senaryo 4 için çözümü sonucu elde edilen bara V_{RMS} değerleri.

Şekil 5.7’de ise uygulanan harmonik analiz metodolojisine göre optimizasyon algoritmasının iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değişimi sunulmuştur. Bu şekilden, optimal çözüme ulaşılan iterasyon sayılarının; HEA-HAK için 46, HEA-NED için 48, THGA-HAK için 47 ve THGA-NED için 39 olduğu görülmektedir.



Şekil 5.7: THDV minimizasyon temelli optimal FDÜB ve PF planlama yaklaşımına ait problemin senaryo 4 için iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değerinin (AF) değişimi.

5.4.2 Senaryo 5 için Sonuçlar

Senaryo 5 için harmonik analizlerinde dört farklı algoritma-model çifti uygulanarak, THDV minimizasyonu temelli optimal planlama yaklaşımına göre elde edilen FDÜB baraları ve güçleri Tablo 5.4’de, PF baraları, temel frekans reaktif güçleri ve ayarlandıkları harmonik numaraları ise Tablo 5.5’de sunulmuştur.

Bu tablolardan, tüm algoritma-model çiftlerine göre yapılan analizlerde, FDÜB’lerin aday baraların hepsini kapsayacak şekilde 8, 18, 21, 29 ve 33 nolu baralara yerleştirildiği görülmektedir. Bu aday baralara yerleştirilen FDÜB’lerin güçleri ise sırasıyla; (i) HEA-HAK için 0.1107, 0.007, 0.1063, 1.0293 ve 1.9713 MW, (ii) HEA-NED için 0.2691, 1.0367, 1.5657, 0.4874 ve 0.5065 MW, (iii) THGA-HAK için 0.2986, 1.1030, 0.1428, 0.9341 ve 0.7127 MW ve (iv) THGA-NED için 0.3600, 1.2383, 0.6631, 0.6729 ve 0.7141 MW’dır.

Bununla birlikte, PF'lerin; (i) HEA-HAK uygulandığında 6, 11, 16, 23 ve 30 nolu baralara yerleştirildiği, sırasıyla temel frekans reaktif güçlerinin 0.0786, 0.0671, 0.0245, 0.0828 ve 0.0148 MVar ve ayarlandıkları harmonik numaralarının 9.35, 5.02, 7.02, 16.7 ve 18.06 olduğu, (ii) HEA-NED uygulandığında 6, 11, 16, 23 ve 30 nolu baralara yerleştirildiği, temel frekans reaktif güçlerinin 0.0078, 0.0766, 0.1923, 0.0921 ve 0.0143 MVar ve ayarlandıkları harmonik numaralarının 2.36, 7.13, 18.91, 19.56 ve 18.18 olduğu, (iii) THGA-HAK uygulandığında 6, 11, 16, 19 ve 23 nolu baralara yerleştirildiği, temel frekans reaktif güçlerinin 0.0727, 0.0028, 0.0738, 0.0195 ve 0.0248 MVar ve ayarlandıkları harmonik numaralarının 7.09, 9, 4.99, 17.95 ve 7.63 olduğu, (iv) THGA-NED uygulandığında 6, 11, 16, 19 ve 30 nolu baralara yerleştirildiği, temel frekans reaktif güçlerinin 0.0996, 0.0679, 0.1749, 0.0452 ve 0.0155 MVar ve ayarlandıkları harmonik numaralarının 2.26, 7.1, 18.34, 4.9 ve 17.94 olduğu çıktılarına ulaşılmıştır.

Burada şu belirtilmelidir ki; senaryo 4 ve 5 için farklı algoritma-model çiftlerinin harmonik analizinde uygulanması, THDV minimizasyon temelli optimal FDÜB ve PF planlamasında kayda değer derecede farklı sonuçlara yol açmıştır.

Tablo 5.4: THDV minimizasyon temelli optimal FDÜB ve PF planlama yaklaşımına ait problemin senaryo 5 için çözümü sonucu elde edilen FDÜB baraları ve güçleri.

| | | HEA-HAK | HEA-NED | THGA-HAK | THGA-NED |
|--------|----------------|---------|---------|----------|----------|
| FDÜB 1 | BN_{FV1} | 8 | 8 | 8 | 8 |
| | P_{FV1} (MW) | 0.1107 | 0.2691 | 0.2986 | 0.3600 |
| FDÜB 2 | BN_{FV2} | 18 | 18 | 18 | 18 |
| | P_{FV2} (MW) | 0.007 | 1.0367 | 1.1030 | 1.2383 |
| FDÜB 3 | BN_{FV3} | 21 | 21 | 21 | 21 |
| | P_{FV3} (MW) | 0.1063 | 1.5657 | 0.1428 | 0.6631 |
| FDÜB 4 | BN_{FV4} | 29 | 29 | 29 | 29 |
| | P_{FV4} (MW) | 1.0293 | 0.4874 | 0.9341 | 0.6729 |
| FDÜB 5 | BN_{FV5} | 33 | 33 | 33 | 33 |
| | P_{FV5} (MW) | 1.9713 | 0.5065 | 0.7127 | 0.7141 |

Tablo 5.5: THDV minimizasyon temelli optimal FDÜB ve PF planlama yaklaşımına ait problemin senaryo 5 için çözümü sonucu elde edilen PF baraları, temel frekans reaktif güçleri ve ayarlandıkları harmonik numaraları.

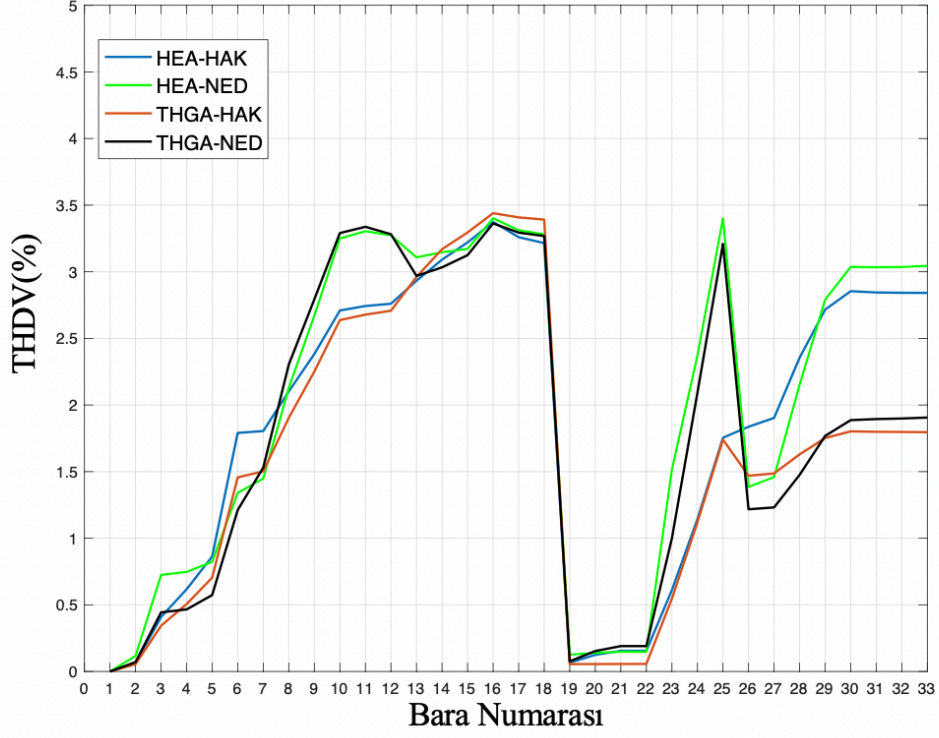
| | | HEA-HAK | HEA-NED | THGA-HAK | THGA-NED |
|------|-------------------------------|---------|---------|----------|----------|
| | BN_{PF1} | 6 | 6 | 6 | 6 |
| PF 1 | Q_{PF1} (MVA _r) | 0.0786 | 0.0078 | 0.0727 | 0.0996 |
| | h_{t1} | 9.35 | 2.36 | 7.09 | 2.26 |
| | BN_{PF2} | 11 | 11 | 11 | 11 |
| PF 2 | Q_{PF2} (MVA _r) | 0.0671 | 0.0766 | 0.0028 | 0.0679 |
| | h_{t2} | 5.02 | 7.13 | 9.00 | 7.10 |
| | BN_{PF3} | 16 | 16 | 16 | 16 |
| PF 3 | Q_{PF3} (MVA _r) | 0.0245 | 0.1923 | 0.0738 | 0.1749 |
| | h_{t3} | 7.02 | 18.91 | 4.99 | 18.34 |
| | BN_{PF4} | 23 | 23 | 19 | 19 |
| PF 4 | Q_{PF4} (MVA _r) | 0.0828 | 0.0921 | 0.0195 | 0.0452 |
| | h_{t4} | 16.70 | 19.56 | 17.95 | 4.90 |
| | BN_{PF5} | 30 | 30 | 23 | 30 |
| PF 5 | Q_{PF5} (MVA _r) | 0.0148 | 0.0143 | 0.0248 | 0.0155 |
| | h_{t5} | 18.06 | 18.18 | 7.63 | 17.94 |

Optimal FDÜB ve PF planlama sonucu elde edilen BK, THDV_M ve VD değerleri Tablo 5.6’da verilmiştir. Bu tablodan; BK, THDV_M ve VD değerlerinin uygulanan metodolojiye göre sırasıyla, (i) HEA-HAK için 0.7424, 3.373 ve 0.0241, (ii) HEA-NED için 0.8900, 3.401 ve 0.0308, (iii) THGA-HAK için 0.7347, 3.439 ve 0.017, THGA-NED için 0.8400, 3.363 ve 0.0213 olduğu ifade edilmelidir.

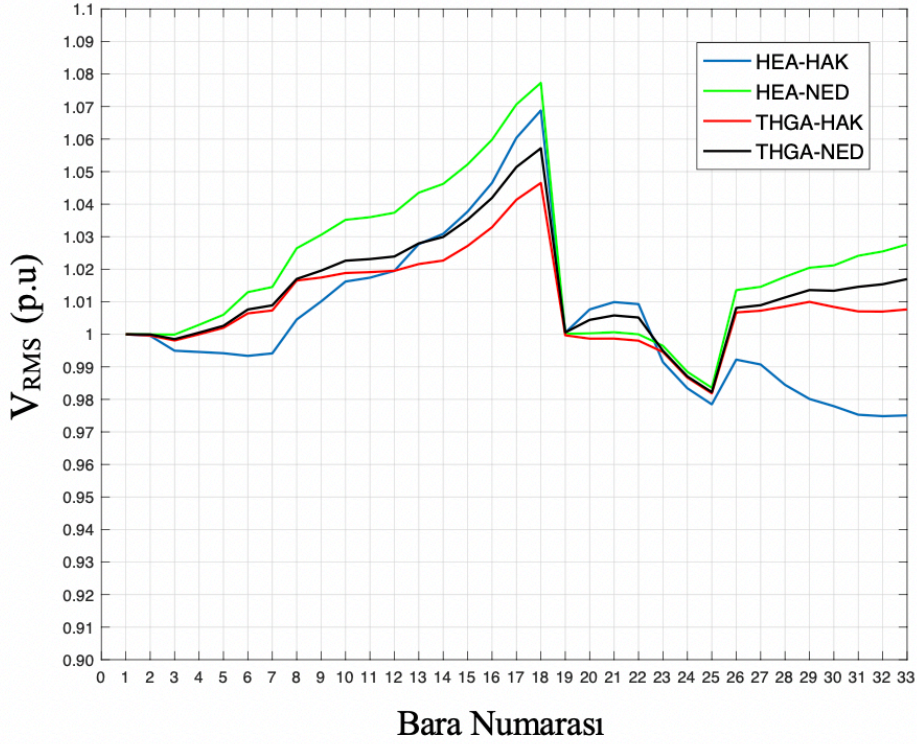
Tablo 5.6: THDV minimizasyon temelli optimal FDÜB ve PF planlama yaklaşımına ait problemin senaryo 5 için çözümü sonucu elde edilen BK, THDV_M ve VD değerleri.

| | HEA-HAK | HEA-NED | THGA-HAK | THGA-NED |
|-----------------------|---------|---------|----------|----------|
| BK | 0.7424 | 0.8900 | 0.7347 | 0.8400 |
| THDV _M (%) | 3.373 | 3.401 | 3.439 | 3.363 |
| VD | 0.0241 | 0.0308 | 0.0170 | 0.0213 |

Şekil 5.8 ve Şekil 5.9’da Senaryo 5 için THDV minimizasyon temelli optimal planlama yaklaşımına göre elde edilen bara THDV ve V_{RMS} değerleri sırasıyla verilmiştir.



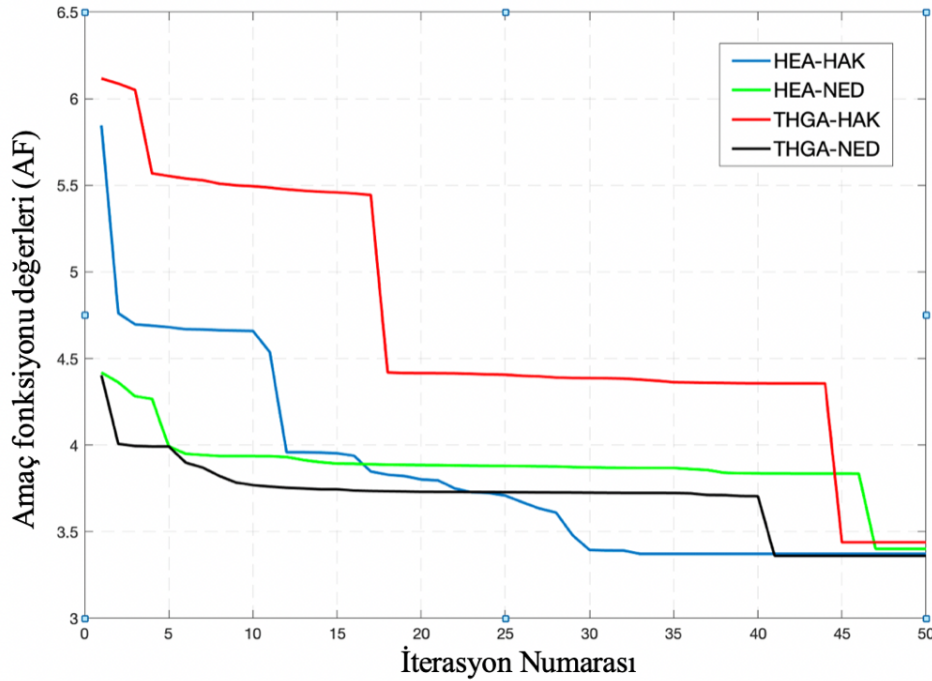
Şekil 5.8: THDV minimizasyon temelli optimal FDÜB ve PF planlama yaklaşımına ait problemin senaryo 5 için çözümü sonucu elde edilen bara THDV değerleri.



Şekil 5.9: THDV minimizasyon temelli optimal FDÜB ve PF planlama yaklaşımına ait problemin senaryo 5 için çözümü sonucu elde edilen bara V_{RMS} değerleri.

Şekil 5.8'den, $THDV_M$ 'nin bütün algoritma-model çiftlerine göre yapılan optimal planlamalar için 16 nolu barada meydana geldiği ifade edilebilir. Şekil 5.9'da verilen eğriler ise; V_{RMS} değerlerinin HEA-HAK için 0.97 ile 1.07 pu, HEA-NED için 0.98 ile 1.08 pu, THGA-HAK için 0.98 ile 1.05 pu, THGA-NED için 0.98 ile 1.06 pu aralıklarında değiştiğini göstermektedir.

Şekil 5.10'da ise uygulanan harmonik analiz metodolojisine göre optimizasyon algoritmasının iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değişimi sunulmuştur. Bu şekil, optimal çözüme ulaşılan iterasyon sayılarının; HEA-HAK için 33, HEA-NED için 47, THGA-HAK için 45 ve THGA-NED için 41 olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.10: THDV minimizasyon temelli optimal FDÜB ve PF planlama yaklaşımına ait problemin senaryo 5 için çözümünde iterasyon sayısı ile AF değişimi.

5.5 Gerilim Profilini ve FDÜB Barındırma Kapasitesini En İyileştirme Temelli

Yaklaşım için Analiz Sonuçları

Bu kısımda, IEEE 33 baralı test sisteminde iki farklı senaryo (Senaryo 4 ve 5) için FDÜB'ler ve PF'lerin optimal boyutlandırılması ve yerleştirilmesinde, gerilim profilini ve FDÜB barındırma kapasitesini en iyileştirme ($THDV_M$ ve VD minimizasyonu, BK maksimizasyonu) temelli yaklaşıma göre elde edilen sonuçlar sunulacaktır. Analizlerde

HEA-HAK, HEA-NED, THGA-HAK ve THGA-NED algoritma-model çiftlerinin sonuca etkisi yorumlanacaktır.

Her iki senaryoda FDÜB'lerin yerleştirilmesi için aday bara olarak 8, 18, 21, 29 ve 33 nolu baralar, PF'lerin yerleştirilmesi için aday bara olarak 6, 11, 16, 19, 23 ve 30 nolu baralar seçilmiştir. Analizlerde, BO algoritması çözümün elde edilmesinde uygulanmıştır.

5.5.1 Senaryo 4 için Sonuçlar

Senaryo 4 için harmonik analizlerinde dört farklı algoritma-model çifti uygulanarak, gerilim profilini ve FDÜB barındırma kapasitesini en iyileştirme temelli optimal planlama yaklaşımına göre elde edilen FDÜB baraları ve güçleri Tablo 5.7'de, PF baraları, temel frekans reaktif güçleri ve ayarlandıkları harmonik numaraları ise Tablo 5.8'de sunulmuştur.

Bu tablolardan, FDÜB'lerin; (i) HEA-HAK uygulandığında 8, 21 ve 33 nolu baralara yerleştirildiği ve güçlerinin sırasıyla 2.9112, 0.5528 ve 0.8789 MW olduğu, (ii) HEA-NED uygulandığında 8, 18 ve 29 nolu baralara yerleştirildiği ve güçlerinin sırasıyla 2.63, 0.447 ve 1.266 MW olduğu, (iii) THGA-HAK uygulandığında 18, 21 ve 33 nolu baralara yerleştirildiği ve güçlerinin sırasıyla 0.3010, 1.0668 ve 2.9752 MW olduğu ve (iv) THGA-NED uygulandığında 18, 21 ve 33 nolu baralara yerleştirildiği ve güçlerinin sırasıyla 0.7301, 1.1172 ve 2.4955 MW olduğu görülmektedir.

PF'lerin; (i) HEA-HAK uygulandığında 6, 11 ve 16 nolu baralara yerleştirildiği, sırasıyla temel frekans reaktif güçlerinin 0.1194, 0.0311 ve 0.0162 MVar ve ayarlandıkları harmonik numaralarının 7.15, 9.42 ve 5.00 olduğu, (ii) HEA-NED uygulandığında 6, 11 ve 23 nolu baralara yerleştirildiği, temel frekans reaktif güçlerinin 0.0754, 0.0135 ve 0.1467 MVar ve ayarlandıkları harmonik numaralarının 9.27, 7.02 ve 4.40 olduğu, (iii) THGA-HAK uygulandığında 11, 16 ve 23 nolu baralara yerleştirildiği, temel frekans reaktif güçlerinin 0.0643, 0.3511 ve 0.0214 MVar ve ayarlandıkları harmonik numaralarının 5.04, 15.42 ve 2.34 olduğu, (iv) THGA-NED uygulandığında 6, 11 ve 16 nolu baralara yerleştirildiği, temel frekans reaktif güçlerinin 0.1509, 0.0215 ve 0.0205 MVar ve ayarlandıkları harmonik numaralarının 10.07, 11.13 ve 7.00 olduğu görülmüştür.

Tablo 5.7: Gerilim profilini ve FDÜB barındırma kapasitesini en iyileştirme temelli optimal FDÜB ve PF planlama yaklaşımına ait problemin senaryo 4 için çözümü sonucu elde edilen FDÜB baraları ve güçleri.

| | | HEA-HAK | HEA-NED | THGA-HAK | THGA-NED |
|--------|----------------|---------|---------|----------|----------|
| FDÜB 1 | BN_{FV1} | 8 | 8 | 18 | 18 |
| | P_{FV1} (MW) | 2.9112 | 2.63 | 0.301 | 0.7301 |
| FDÜB 2 | BN_{FV2} | 21 | 18 | 21 | 21 |
| | P_{FV2} (MW) | 0.5528 | 0.447 | 1.0668 | 1.1172 |
| FDÜB 3 | BN_{FV3} | 33 | 29 | 33 | 33 |
| | P_{FV3} (MW) | 0.8789 | 1.266 | 2.9752 | 2.4955 |

Tablo 5.8: Gerilim profilini ve FDÜB barındırma kapasitesini en iyileştirme temelli optimal FDÜB ve PF planlama yaklaşımına ait problemin senaryo 4 için çözümü sonucu elde edilen PF baraları, temel frekans reaktif güçleri ve ayarlandıkları harmonik numaraları.

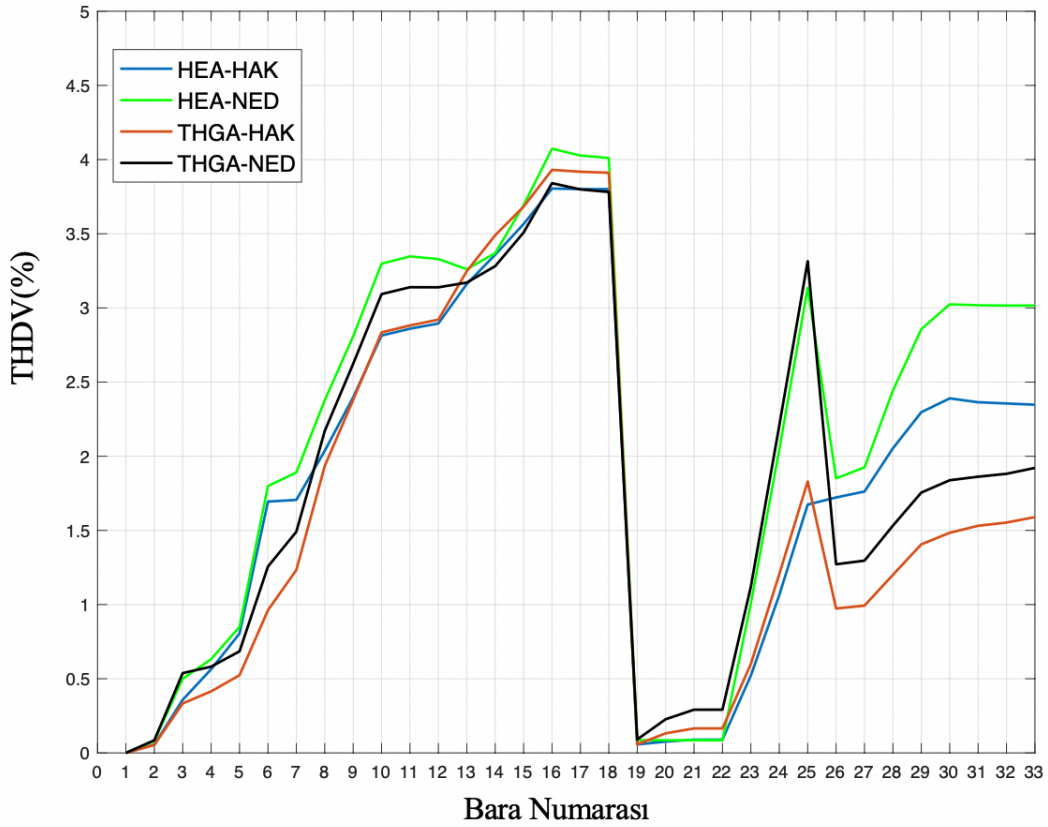
| | | HEA-HAK | HEA-NED | THGA-HAK | THGA-NED |
|------|-------------------------------|---------|---------|----------|----------|
| PF 1 | BN_{PF1} | 6 | 6 | 11 | 6 |
| | Q_{PF1} (MVA _r) | 0.1194 | 0.0754 | 0.0643 | 0.1509 |
| | h_{f1} | 7.15 | 9.27 | 5.04 | 10.07 |
| PF 2 | BN_{PF2} | 11 | 11 | 16 | 11 |
| | Q_{PF2} (MVA _r) | 0.0311 | 0.0135 | 0.3511 | 0.0215 |
| | h_{f2} | 9.42 | 7.02 | 15.42 | 11.13 |
| PF 3 | BN_{PF3} | 16 | 23 | 23 | 16 |
| | Q_{PF3} (MVA _r) | 0.0162 | 0.1467 | 0.0214 | 0.0205 |
| | h_{f3} | 5.00 | 4.40 | 2.34 | 7.00 |

Bu optimal FDÜB ve PF planlamasıyla ulaşılan BK, THDV_M, VD ve amaç fonksiyonu (AF) değerleri Tablo 5.9’da verilmiştir. Bu tablodan; BK, THDV_M, VD ve AF değerlerinin uygulanan metodolojiye göre sırasıyla, (i) HEA-HAK için 0.9999, 3.804, 0.0145 ve 0.429, (ii) HEA-NED için 0.9999, 4.073, 0.0243 ve 0.449, (iii) THGA-HAK için 1.000, 3.93, 0.0259 ve 0.444, (iv) THGA-NED için 0.9999, 3.84, 0.0208 ve 0.435 olduğu ifade edilmelidir.

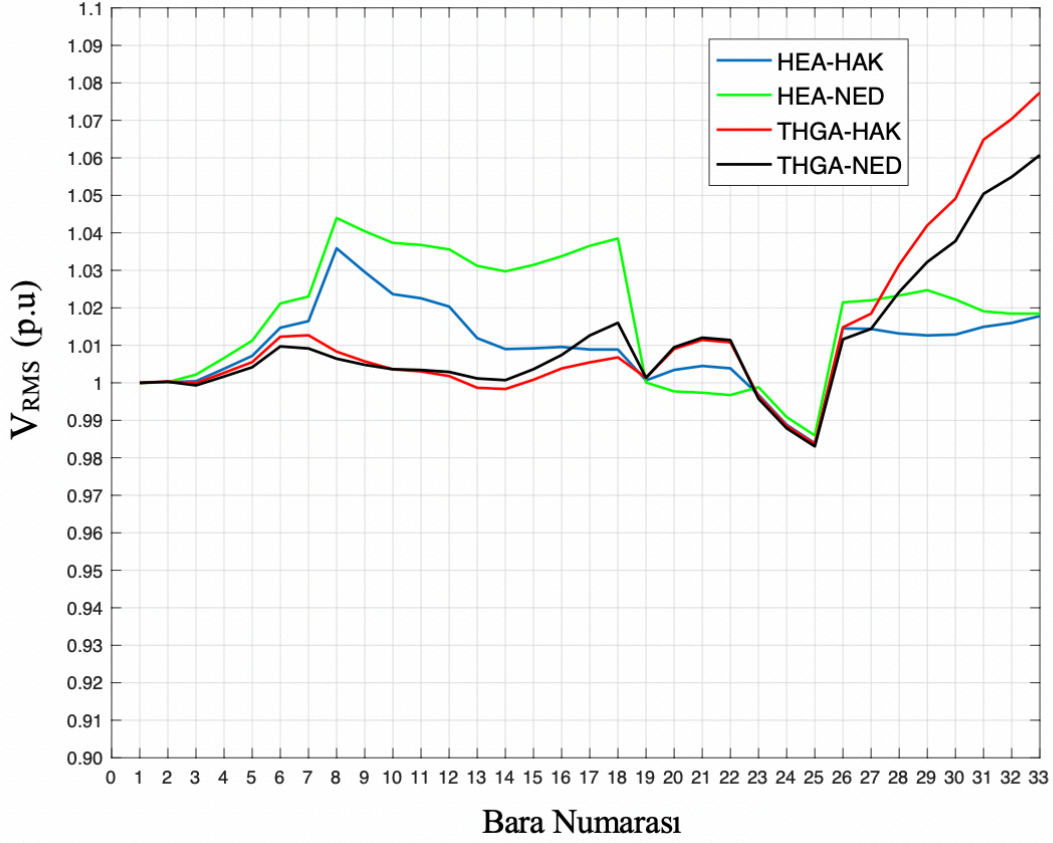
Senaryo 4 için optimal FDÜB ve PF planlama neticesinde elde edilen bara THDV ve V_{RMS} değerleri ise Şekil 5.11 ve Şekil 5.12’de sunulmuştur.

Tablo 5.9: Gerilim profilini ve FDÜB barındırma kapasitesini en iyileştirme temelli optimal FDÜB ve PF planlama yaklaşımına ait problemin senaryo 4 için çözümü sonucu elde edilen BK, THDV_M, VD ve AF değerleri.

| | HEA-HAK | HEA-NED | THGA-HAK | THGA-NED |
|-----------------------|---------|---------|----------|----------|
| BK | 0.9999 | 0.9999 | 1.000 | 0.9999 |
| THDV _M (%) | 3.804 | 4.073 | 3.93 | 3.84 |
| VD | 0.0145 | 0.0243 | 0.0259 | 0.0208 |
| AF | 0.429 | 0.449 | 0.444 | 0.435 |



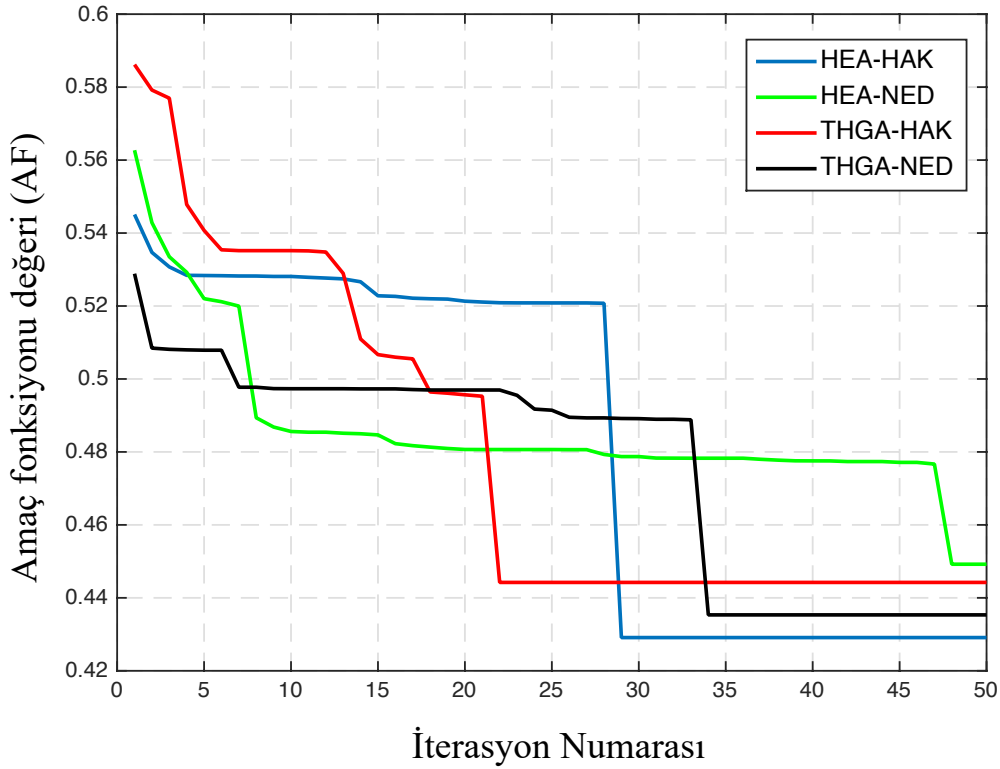
Şekil 5.11: Gerilim profilini ve FDÜB barındırma kapasitesini en iyileştirme temelli optimal FDÜB ve PF planlama yaklaşımına ait problemin senaryo 4 için çözümü sonucu elde edilen bara THDV değerleri.



Şekil 5.12: Gerilim profilini ve FDÜB barındırma kapasitesini en iyileştirme temelli optimal FDÜB ve PF planlama yaklaşımına ait problemin senaryo 4 için çözümü sonucu elde edilen bara V_{RMS} değerleri.

Şekil 5.11'den, $THDV_M$ 'nin, HEA-HAK, HEA-NED, THGA-HAK ve THGA-NED'e göre yapılan optimal planlamalar için 16 nolu barada meydana geldiği ifade edilebilir. Şekil 5.12'de verilen eğriler ise; V_{RMS} değerlerinin HEA-HAK için 0.98 ile 1.04 pu, HEA-NED için 0.98 ile 1.05 pu, THGA-HAK için 0.98 ile 1.08 pu, THGA-NED için 0.98 ile 1.07 pu aralıklarında değiştiğini göstermektedir.

Şekil 5.13'te ise uygulanan harmonik analiz metodolojisine göre optimizasyon algoritmasının iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değişimi sunulmuştur. Bu şekil, optimal çözüme ulaşılan iterasyon sayılarının; HEA-HAK için 29, HEA-NED için 48, THGA-HAK için 22 ve THGA-NED için 34 olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.13: Gerilim profilini ve FDÜB barındırma kapasitesini en iyileştirme temelli optimal FDÜB ve PF planlama yaklaşımına ait problemin senaryo 4 için çözümünde iterasyon sayısı ile AF değerinin değişimi.

5.5.2 Senaryo 5 için Sonuçlar

Senaryo 5 için harmonik analizlerinde dört farklı algoritma-model çifti uygulanarak, gerilim profilini ve FDÜB barındırma kapasitesini en iyileştirme temelli optimal planlama yaklaşımına göre elde edilen FDÜB baraları ve güçleri Tablo 5.10’da, PF baraları, temel frekans güçleri ve ayarlandıkları harmonik numaraları ise Tablo 5.11’de sunulmuştur.

Bu tablolardan, tüm algoritma-model çiftlerine göre yapılan analizlerde, FDÜB’lerin aday baraların hepsini kapsayacak şekilde 8, 18, 21, 29 ve 33 nolu baralara yerleştirildiği görülmektedir. Bu aday baralara yerleştirilen FDÜB’lerin güçleri ise sırasıyla; (i) HEA-HAK için 1.0656, 0.869, 0.9365, 0.486 ve 0.9862 MW, (ii) HEA-NED için 0.3309, 0.8745, 1.4415, 0.609 ve 1.0704 MW, (iii) THGA-HAK için 0.5037, 0.7508, 1.4133, 1.4985 ve 0.1688 MW ve (iv) THGA-NED için 1.002, 0.791, 1.4632, 0.6984 ve 0.3879 MW’dır.

Bununla birlikte, PF’lerin; (i) HEA-HAK uygulandığında 6, 11, 16, 23 ve 30 nolu baralara yerleştirildiği, temel frekans reaktif güçlerinin 0.0135, 0.0564, 0.1532, 0.1179 ve 0.0775

MVAr ve ayarlandıkları harmonik numaralarının 7.02, 5.03, 11.54, 14.07 ve 17.1 olduğu, (ii) HEA-NED uygulandığında 6, 11, 16, 23 ve 30 nolu baralara yerleştirildiği, temel frekans reaktif güçlerinin 0.0458, 0.0197, 0.0656, 0.0327 ve 0.0776 MVAr ve ayarlandıkları harmonik numaralarının 6.09, 7.03, 12.87, 11.08 ve 16.94 olduğu, (iii) THGA-HAK uygulandığında 6, 11, 16, 19 ve 30 nolu baralara yerleştirildiği, temel frekans reaktif güçlerinin 0.0639, 0.0248, 0.1682, 0.0591 ve 0.0092 MVAr ve ayarlandıkları harmonik numaralarının 7.1, 4.99, 18.22, 7.51 ve 12.92 olduğu, (iv) THGA-NED uygulandığında 6, 11, 16, 23 ve 30 nolu baralara yerleştirildiği, temel frekans reaktif güçlerinin 0.0717, 0.03, 0.1337, 0.0733 ve 0.0267 MVAr ve ayarlandıkları harmonik numaralarının 18.02, 7.01, 16.34, 15.01 ve 16.04 olduğu görülmüştür.

THDV minimizasyon temelli yaklaşımda olduğu gibi farklı algoritma-model çiftlerinin harmonik analizinde uygulanması, gerilim profilini ve FDÜB barındırma kapasitesini en iyileştirme temelli optimal FDÜB ve PF planlamasında da kayda değer derecede farklı sonuçlara yol açmıştır.

Tablo 5.10: Gerilim profilini ve FDÜB barındırma kapasitesini en iyileştirme temelli optimal FDÜB ve PF planlama yaklaşımına ait problemin senaryo 5 için çözümü sonucu elde edilen FDÜB baraları ve güçleri.

| | | HEA-HAK | HEA-NED | THGA-HAK | THGA-NED |
|--------|----------------|---------|---------|----------|----------|
| FDÜB 1 | BN_{FV1} | 8 | 8 | 8 | 8 |
| | P_{FV1} (MW) | 1.0656 | 0.3309 | 0.5037 | 1.002 |
| FDÜB 2 | BN_{FV2} | 18 | 18 | 18 | 18 |
| | P_{FV2} (MW) | 0.869 | 0.8745 | 0.7508 | 0.791 |
| FDÜB 3 | BN_{FV3} | 21 | 21 | 21 | 21 |
| | P_{FV3} (MW) | 0.9365 | 1.4415 | 1.4133 | 1.4632 |
| FDÜB 4 | BN_{FV4} | 29 | 29 | 29 | 29 |
| | P_{FV4} (MW) | 0.486 | 0.6090 | 1.4985 | 0.6984 |
| FDÜB 5 | BN_{FV5} | 33 | 33 | 33 | 33 |
| | P_{FV5} (MW) | 0.9862 | 1.0704 | 0.1688 | 0.3879 |

Tablo 5.11: Gerilim profilini ve FDÜB barındırma kapasitesini en iyileştirme temelli optimal FDÜB ve PF planlama yaklaşımına ait problemin senaryo 5 için çözümü sonucu elde edilen PF baraları, temel frekans reaktif güçleri ve ayarlandıkları harmonik numaraları.

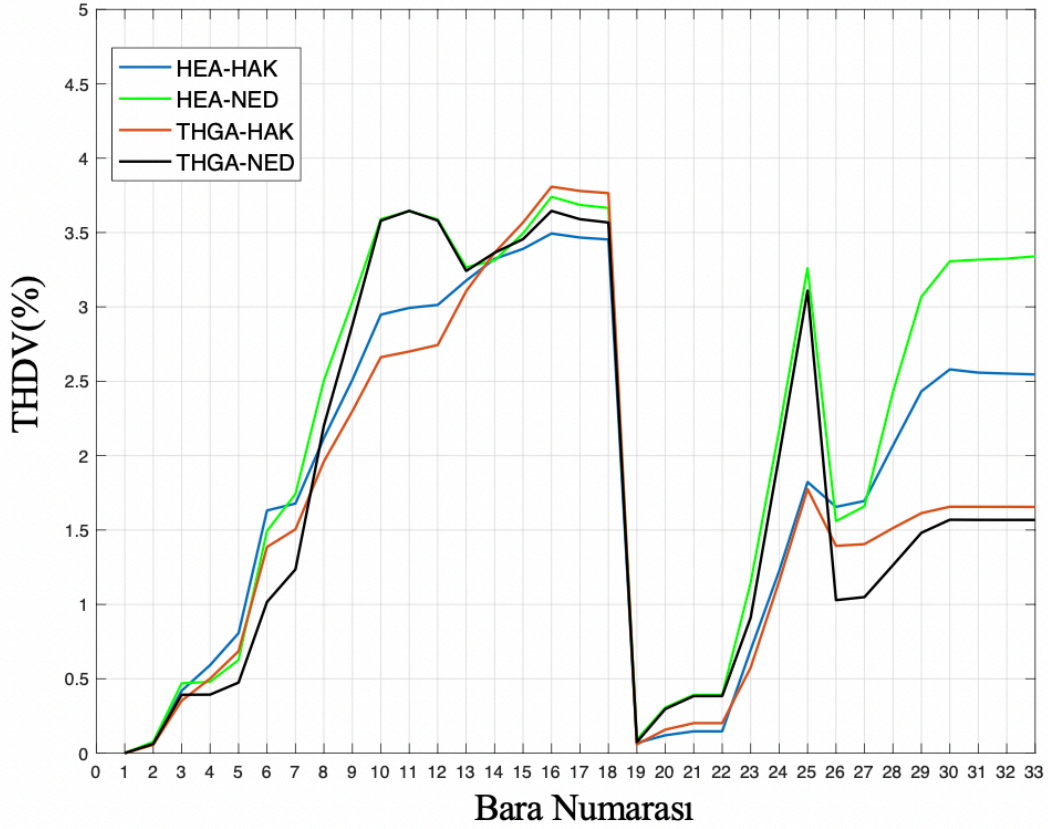
| | | HEA-HAK | HEA-NED | THGA-HAK | THGA-NED |
|------|------------------|---------|---------|----------|----------|
| | BN_{PF1} | 6 | 6 | 6 | 6 |
| PF 1 | Q_{PF1} (MVar) | 0.0135 | 0.0458 | 0.0639 | 0.0717 |
| | h_{t1} | 7.02 | 6.09 | 7.10 | 18.02 |
| | BN_{PF2} | 11 | 11 | 11 | 11 |
| PF 2 | Q_{PF2} (MVar) | 0.0564 | 0.0197 | 0.0248 | 0.03 |
| | h_{t2} | 5.03 | 7.03 | 4.99 | 7.01 |
| | BN_{PF3} | 16 | 16 | 16 | 16 |
| PF 3 | Q_{PF3} (MVar) | 0.1532 | 0.0656 | 0.1682 | 0.1337 |
| | h_{t3} | 11.54 | 12.87 | 18.22 | 16.34 |
| | BN_{PF4} | 23 | 23 | 19 | 23 |
| PF 4 | Q_{PF4} (MVar) | 0.1179 | 0.0327 | 0.0591 | 0.0733 |
| | h_{t4} | 14.07 | 11.08 | 7.51 | 15.01 |
| | BN_{PF5} | 30 | 30 | 30 | 30 |
| PF 5 | Q_{PF5} (MVar) | 0.0775 | 0.0776 | 0.0092 | 0.0267 |
| | h_{t5} | 17.10 | 16.94 | 12.92 | 16.04 |

Bu optimal FDÜB ve PF planlamasıyla elde edilen BK, $THDV_M$, VD ve AF değerleri Tablo 5.12’de verilmiştir. Bu tablodan; BK, $THDV_M$, VD ve AF değerlerinin uygulanan metodolojiye göre sırasıyla, (i) HEA-HAK için 1.0000, 3.493, 0.0203 ve 0.418, (ii) HEA-NED için 0.9961, 3.74, 0.0118 ve 0.425, (iii) THGA-HAK için 0.9981, 3.807, 0.0121 ve 0.428, (iv) THGA-NED için 1.0000, 3.645, 0.0137 ve 0.421 olduğu ifade edilmelidir.

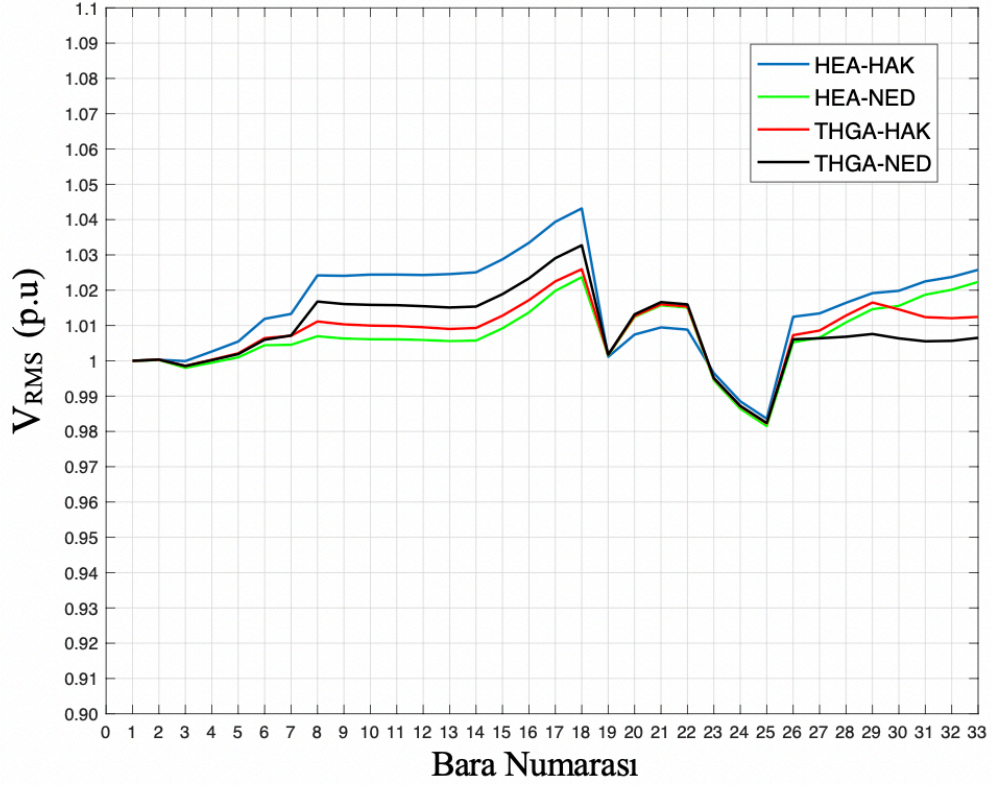
Tablo 5.12: Gerilim profilini ve FDÜB barındırma kapasitesini en iyileştirme temelli optimal FDÜB ve PF planlama yaklaşımına ait problemin senaryo 5 için çözümü sonucu elde edilen BK, $THDV_M$, VD ve AF değerleri.

| | HEA-HAK | HEA-NED | THGA-HAK | THGA-NED |
|--------------|---------|---------|----------|----------|
| BK | 1.0000 | 0.9961 | 0.9981 | 1.0000 |
| $THDV_M$ (%) | 3.493 | 3.740 | 3.807 | 3.645 |
| VD | 0.0203 | 0.0118 | 0.0121 | 0.0137 |
| AF | 0.418 | 0.425 | 0.428 | 0.421 |

Senaryo 5 için optimal FDÜB ve PF planlama yaklaşımı neticesinde elde edilen bara THDV ve V_{RMS} değerleri Şekil 5.14 ve Şekil 5.15’de sunulmuştur. Bu şekillerden, $THDV_M$ ’nin, THGA-NED için 11 nolu barada diğer algoritma-model çiftlerine göre yapılan optimal planlamalar için 16 nolu barada meydana geldiği, V_{RMS} değerlerinin ise HEA-HAK için 0.98 ile 1.05 pu, HEA-NED için 0.98 ile 1.02 pu, THGA-HAK için 0.98 ile 1.03 pu, THGA-NED için 0.98 ile 1.04 pu aralıklarında değiştiği ifade edilebilir.

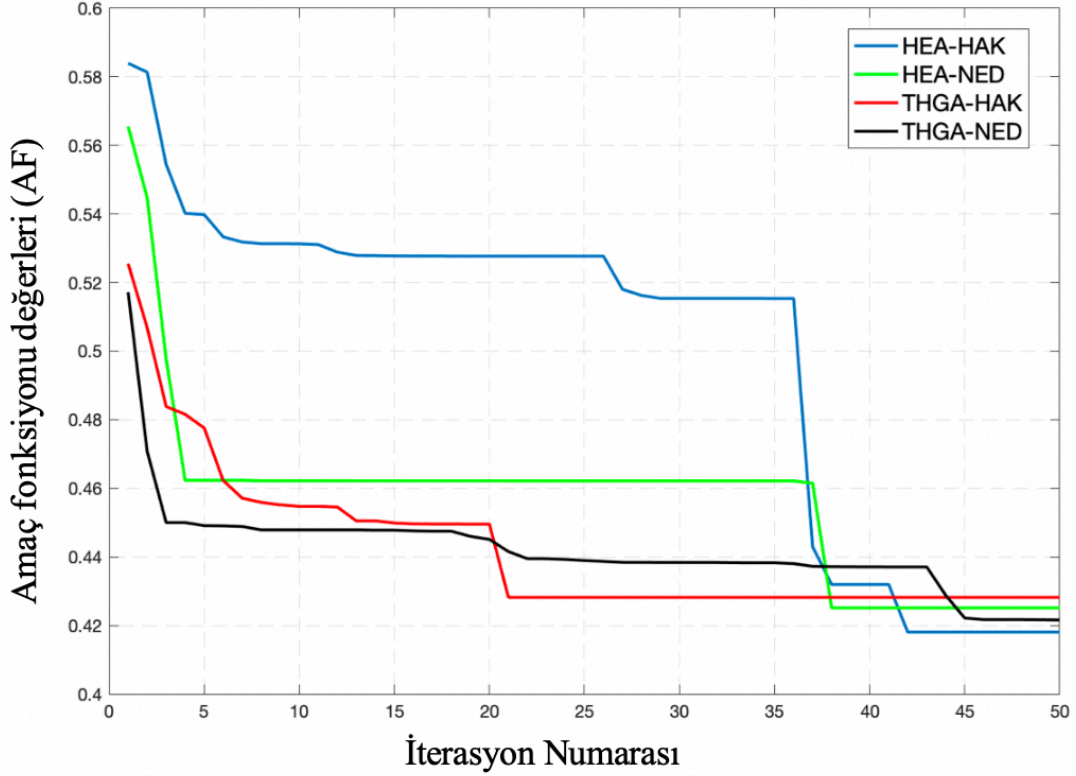


Şekil 5.14: Gerilim profilini ve FDÜB barındırma kapasitesini en iyileştirme temelli optimal FDÜB ve PF planlama yaklaşımına ait problemin senaryo 5 için çözümü sonucu elde edilen bara THDV değerleri.



Şekil 5.15: Gerilim profilini ve FDÜB barındırma kapasitesini en iyileştirme temelli optimal FDÜB ve PF planlama yaklaşımına ait problemin senaryo 5 için çözümü sonucu elde edilen bara V_{RMS} değerleri.

Şekil 5.16'da ise uygulanan harmonik analiz metodolojisine göre optimizasyon algoritmasının iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değişimi sunulmuştur. Bu şekil, optimal çözüme ulaşılan iterasyon sayılarının; HEA-HAK için 42, HEA-NED için 38, THGA-HAK için 21 ve THGA-NED için 46 olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.16: Gerilim profilini ve FDÜB barındırma kapasitesini en iyileştirme temelli optimal FDÜB ve PF planlama yaklaşımına ait problemin senaryo 5 için çözümünde iterasyon sayısı ile AF değerinin değişimi.

5.6 Sonuç

Bu bölümde, öncelikle FDÜB'ler ve PF'ler için (i) THDV minimizasyon temelli ve (ii) gerilim profilini ve FDÜB barındırma kapasitesini en iyileştirme temelli optimal yerleştirme ve boyutlandırma yaklaşımlarının amaç fonksiyonu ve kısıtları sunulmuştur. İlk yaklaşım FDÜB ve PF'lerin gerilim harmonik iyileştirmeye odaklanan optimal kullanımı olup ikinci yaklaşım ise gerilim harmonik bozulma ve rms seviyelerinin iyileştirilmesi yanı sıra sisteme azami FDÜB gücünün aktarımına odaklanan optimal planlamadır. Bu yaklaşımların sunumu sonrasında, optimizasyon problemlerinin çözümünde uygulanan balina optimizasyonu (BO) algoritması hakkında bilgi verilmiştir.

Daha sonra, dikkate alınan yaklaşımlara göre tanımlanan optimal FDÜB ve PF planlama problemi iki farklı senaryo için BO algoritması kullanılarak çözülmüştür. Çözümler elde edilirken harmonik analizleri için HEA-HAK, HEA-NED, THGA-HAK ve THGA-NED algoritma-model çiftleri uygulanmıştır.

Bu yapılan çalışmalar neticesinde elde edilen sonuçlar yorumlanacak olursa;

- Optimal FDÜB ve PF planlamasının, dikkate alınan harmonik analiz algoritması ve harmonik üreten eleman (yük veya FDÜB) modeline bağlı olarak önemli farklılıklar gösterdiği,
- Aynı harmonik analiz algoritma-model çiftleri için gerilim profilini ve FDÜB barındırma kapasitesini en iyileştirme temelli yaklaşımın, THDV minimizasyon temelli yaklaşımla karşılaştırıldığında; ulaşılan azami THDV seviyelerinin ($THDV_M$) birbirine çok yakın olduğu, bununla birlikte ilk yaklaşımın genel olarak daha iyi bir gerilim rms değer dağılımını (daha küçük VD değerlerini) sağladığı ve sisteme daha yüksek FDÜB entegrasyonuna izin verdiği (daha yüksek BK değerlerine ulaştığı),
- Dolayısıyla, FDÜB ve PF'lerin harmonik bozulmanın iyileştirilmesi odaklı bir güç kalitesi iyileştirme aracı olarak birlikte planlanmasının azami FDÜB gücünün sisteme verilmesi noktasında dezavantajlı olduğu,
- Gerilim profilini ve FDÜB barındırma kapasitesini en iyileştirme temelli yaklaşımın uygulanmasında, model-algoritma çiftleri arasında, ulaşılan BK değeri bakımından önemli derecede bir fark gözlemlenmediği, diğer taraftan THDV minimizasyon temelli yaklaşımın uygulanmasında dikkate alınan algoritma-model çiftinin ulaşılan BK değerlerinde önemli farka yol açtığı, çıktıları ifade edilebilir.

6. SONUÇ

Bu tez çalışmasında ilk olarak, programlanabilir gerilim kaynağı, yük ve fotovoltaik dağıtık üretim birimi (FDÜB) barındıran küçük bir test sistemi kurulmuştur. Bu test sisteminde, FDÜB'lerin çeşitli yüklenme oranlarında, farklı THDV seviyelerine ve harmonik bileşenlere sahip çok sayıda bağlantı noktası gerilimleri altında ölçümler alınmıştır. Ölçüm verilerinin bir kısmıyla test edilen FDÜB için harmonik akım kaynağı (HAK), Norton eşdeğer devre (NED) ve çapraz frekans admittans matris (ÇFAM) modelleri oluşturulmuştur. Geri kalan ölçüm verileri referans alınarak, modellerin FDÜB akımının Toplam Demand Distorsiyon indisinin (TDD) hesabında yaptıkları hata ($Hata_{TDD}$) değerleri istatistiksel olarak analiz edilmiştir. Ayrıca, FDÜB'lerin çeşitli yüklenme oranlarında, farklı THDV seviyelerine ve harmonik bileşenlere sahip çok sayıda bağlantı noktası gerilimleri altında akım harmonik bozulma değişimi incelenmiştir. Yapılan ölçüm temelli istatistiksel analizlerden,

- Bağlantı noktası gerilim harmonik bozulmasının (THDV'nin) FDÜB akımının harmonik bozulmasına (THDI'ya) etkisinin düşük güç seviyelerinde (yüklenme değerlerinde) daha fazla olduğu,
- Ayrıca, düşük güç seviyelerinde ölçülen THDI verilerinin standart sapmasının, yüksek güç seviyelerinde ölçülen THDI verilerinin standart sapma değerine göre daha büyük olduğu bir başka ifadeyle daha geniş aralıklarda değişim gösterdiği,
- HAK ve ÇFAM modellerinin $Hata_{TDD}$ değerlerinin, THDV artışından ve yüklenme oranından dikkate değer derecede etkilendiği, ancak NED modeli için böyle bir durumun söz konusu olmadığı,
- Hassasiyet bakımından en iyiden en kötüye modellerin NED, ÇFAM ve HAK olarak sıralanabileceği,
- Genel olarak, NED model için elde edilen hata ölçümlerinin standart sapma değerlerinin, HAK ve ÇFAM modellerinin hatalarına ilişkin standart sapma değerlerine göre daha küçük olduğu dolayısıyla NED model için hatanın diğer iki modele göre daha kestirilebilir olduğu,

sonuçlarına varılmıştır.

Modeller arasında yapılan niteliksel analizler ise HAK modelin oluşturulma ve uygulama bakımından en pratik model olduğunu, ÇFAM modelin ise her iki yönden karmaşıklığı en fazla model olduğunu göstermiştir. Bu sebeple hem pratik olmamasından dolayı hem de NED'e göre hassasiyet bakımından kötü performans sergilemesinde dolayı, sonraki

bölümlerde algoritma-model çiftlerinin IEEE 33 baralı test sistemi için karşılaştırmalı analizlerinde ve optimal FDÜB-PF planlama çalışmalarında bu modele yer verilmemiştir. En hassas (NED) ve en pratik (HAK) modelleri harmonik analiz algoritmalarına entegre edilmiştir. Böylece, HAK ve NED modelleri literatürde en yaygın kullanılan harmonik analiz algoritmaları olan harmonik etkileşim analizi (HEA) ve tam harmonik güç akışı (THGA) algoritmalarına entegre edilerek, IEEE 33 baralı test sistemi için HEA-HAK, HEA-NED, THGA-HAK ve THGA-NED algoritma-model çiftlerinin MATLAB kodları hazırlanmıştır. IEEE 33 baralı test sisteminde çeşitli FDÜB senaryoları için HEA-HAK, THGA-HAK, HEA-NED ve THGA-NED algoritma-model çiftlerinin sonuçları ve hızları karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Bu analizler neticesinde,

- Algoritma-model çifti seçiminin baralara ait hesaplanan THDV değerlerinde önemli farklılıklara yol açtığı diğer bir ifadeyle harmonik analiz sonucuna önemli derecede etki ettiği,
- Hesaplanan bara THDV eğrilerinin gerek trendleri gerekse değerleri gözönüne alındığında modellerin algoritmalara göre sonuca daha fazla etki ettiği,
- Tüm algoritma-model çiftleri için V_{RMS} eğrilerinin aynı trendi gösterdiği,
- Aynı toplam güç değerinde olmasına rağmen farklı baralara dağıtılmış FDÜB'lerin THDV üzerinde dikkate değer farklara yol açtığı, bir başka ifadeyle sistemin THDV profili üzerinde FDÜB'lerin gücünün yanı sıra yerleşim yerlerinin de etkisinin olduğu,
- Algoritma-model çiftlerinin, çözüme ulaştıkları çalışma süresinin uzunluğuna göre en kısıdan en uzuna doğru, HEA-HAK, HEA-NED, THGA-HAK ve THGA-NED olarak sıralandığı, diğer taraftan algoritmaların çözüme ulaştıkları iterasyon sayılarının incelenen senaryolar için aynı olduğu,

çıktılarına ulaşılmıştır.

Son olarak, IEEE 33 baralı test sisteminde, optimal FDÜB ve PF boyutlandırma ve yerleştirme problemlerinin çözümü için literatürde henüz önerilen balina optimizasyon (BO) algoritması uygulanmıştır. Boyutlandırma ve yerleştirme algoritmalarında amaç fonksiyonu olarak; baralara ait en yüksek toplam gerilim harmonik bozulma ($THDV_M$) değerinin minimizasyonu, bara gerilimlerinin rms sapma değerinin (VD) minimizasyonu ve sistemin FDÜB barındırma kapasitesinin (BK) maksimizasyonu önerilmiştir. Ayrıca, optimal FDÜB ve PF boyutlandırma ve yerleştirme probleminin çözümünde, literatürdeki filtre planlama ve

FDÜB planlama çalışmalarında daha önce dikkate alınmış THDV minimizasyonu amaç fonksiyonu olarak dikkate alınmış ve problem çözülmüştür. Her iki yaklaşım uygulanarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Optimal planlama problemi çözümlenirken HEA-HAK, HEA-NED, THGA-HAK ve THGA-NED algoritma-model çiftlerinin sonuca etkileri yorumlanmıştır. Bu yapılan çalışmalar neticesinde elde edilen sonuçlar yorumlanarak,

- Optimal FDÜB ve PF planlamasının, dikkate alınan harmonik analiz algoritması ve harmonik üreten eleman (yük veya FDÜB) modeline bağlı olarak önemli farklılıklar gösterdiği,
- Aynı harmonik analiz algoritma-model çiftleri için gerilim profilini ve FDÜB barındırma kapasitesini en iyileştirme temelli yaklaşımın, THDV minimizasyon temelli yaklaşımla karşılaştırıldığında; ulaşılan azami THDV seviyelerinin ($THDV_M$) birbirine çok yakın olduğu, bununla birlikte ilk yaklaşımın genel olarak daha iyi bir gerilim rms değer dağılımını (daha küçük VD değerlerini) sağladığı ve sisteme daha yüksek FDÜB entegrasyonuna izin verdiği (daha yüksek BK değerlerine ulaştığı),
- Dolayısıyla, FDÜB ve PF'lerin harmonik bozulmanın iyileştirilmesi odaklı bir güç kalitesi iyileştirme aracı olarak birlikte planlanmasının azami FDÜB gücünün sisteme verilmesi noktasında dezavantajlı olduğu,
- Gerilim profilini ve FDÜB barındırma kapasitesini en iyileştirme temelli yaklaşımın uygulanmasında, model-algoritma çiftleri arasında, ulaşılan BK değeri bakımından önemli derecede bir fark gözlemlenmediği, diğer taraftan THDV minimizasyon temelli yaklaşımın uygulanmasında dikkate alınan algoritma-model çiftinin ulaşılan BK değerlerinde önemli farka yol açtığı,

çıktılarına ulaşılmıştır.

Bu tezin devamı niteliğinde olacak ileriki çalışmalarda, harmonik bozulmanın yanı sıra dengesizliğin de bulunduğu sistemler için optimal FDÜB ve filtre planlama algoritmalarının geliştirilmesi planlanmaktadır.

7. KAYNAKLAR

- [1] T. Ackermann, "Distributed generation : a definition," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 57, pp. 195–204, 2001.
- [2] P. Paliwal, N. P. Patidar, and R. K. Nema, "Planning of grid integrated distributed generators: A review of technology, objectives and techniques," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 40, pp. 557–570, 2014.
- [3] L. Li, H. Mu, N. Li, and M. Li, "Economic and environmental optimization for distributed energy resource systems coupled with district energy networks," *Energy*, vol. 109, pp. 947–960, 2016.
- [4] F. Katiraei and J. R. Aguero, "Solar PV integration challenges," *IEEE Power Energy Mag.*, vol. 9, no. 3, pp. 62–71, 2011.
- [5] G. Masson, S. Orlandi, and M. Rekinge, "Global market outlook for photovoltaics 2014-2018," *Eur. Photovolt. Ind. Assoc.*, vol. 60, p. 12, 2014.
- [6] Y. K. Wu, J. H. Lin, and H. J. Lin, "Standards and Guidelines for Grid-Connected Photovoltaic Generation Systems: A Review and Comparison," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 53, no. 4, pp. 3205–3216, 2017.
- [7] S. Mirhassani, H. C. Ong, W. T. Chong, and K. Y. Leong, "Advances and challenges in grid tied photovoltaic systems," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 49, pp. 121–131, 2015.
- [8] M. Mohammadi, A. M. Rozbahani, and M. Montazeri, "Multi criteria simultaneous planning of passive filters and distributed generation simultaneously in distribution system considering nonlinear loads with adaptive bacterial foraging optimization approach," *Int. J. Elec. Power Energy Syst.*, vol. 79, pp. 253–262, 2016.
- [9] G. K. Singh, "Power system harmonics research : a survey," *Elec. Energy Syst.*, vol. 19, no. 2, pp. 151–172, 2009.
- [10] A. Kalair, N. Abas, A. R. Kalair, Z. Saleem, and N. Khan, "Review of harmonic analysis, modeling and mitigation techniques," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 78, no. April, pp. 1152–1187, 2017.
- [11] S. H. E. A. Aleem, M. E. Balci, A. F. Zobaa, and S. Sakar, "Optimal passive filter design for effective utilization of cables and transformers under non-sinusoidal conditions," in *2014 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, 2014, pp. 626–630.
- [12] S. Sakar, M. E. Balci, S. H. E. Abdel Aleem, and A. F. Zobaa, "Increasing PV hosting capacity in distorted distribution systems using passive harmonic filtering," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 148, pp. 74–86, 2017.
- [13] S. Sakar, M. E. Balci, S. H. E. A. Aleem, and A. F. Zobaa, "Integration of large-scale PV plants in non-sinusoidal environments: Considerations on hosting capacity and harmonic distortion limits," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 82, pp. 176–186, 2018.
- [14] L. Hassaine, E. OLias, J. Quintero, and V. Salas, "Overview of power inverter topologies and control structures for grid connected photovoltaic systems," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 30, pp. 796–807, 2014.

- [15] S. Kouro, J. I. Leon, D. Vinnikov, and L. G. Franquelo, "Grid-connected photovoltaic systems: An overview of recent research and emerging PV converter technology," *IEEE Ind. Electron. Mag.*, vol. 9, no. 1, pp. 47–61, 2015.
- [16] M. Obi and R. Bass, "Trends and challenges of grid-connected photovoltaic systems—A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 58, pp. 1082–1094, 2016.
- [17] A. Anzalchi and A. Sarwat, "Overview of technical specifications for grid-connected photovoltaic systems," *Energy Convers. Manag.*, vol. 152, pp. 312–327, 2017.
- [18] A. Jäger-Waldau *et al.*, "Self-consumption of electricity produced from PV systems in apartment buildings-comparison of the situation in Australia, Austria, Denmark, Germany, Greece, Italy, Spain, Switzerland and the USA," in *2018 IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC)(A Joint Conference of 45th IEEE PVSC, 28th PVSEC & 34th EU PVSEC)*, 2018, pp. 1424–1430.
- [19] R. C. Dugan, T. S. Key, and G. J. Ball, "Distributed resources standards," *IEEE Ind. Appl. Mag.*, vol. 12, no. 1, pp. 27–34, 2006.
- [20] M. Karimi, H. Mokhlis, K. Naidu, S. Uddin, and A. H. A. Bakar, "Photovoltaic penetration issues and impacts in distribution network - A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 53, pp. 594–605, 2016.
- [21] M. M. Haque and P. Wolfs, "A review of high PV penetrations in LV distribution networks: Present status, impacts and mitigation measures," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 62, pp. 1195–1208, 2016.
- [22] G. Chicco, J. Schlabbach, and F. Spertino, "Experimental assessment of the waveform distortion in grid-connected photovoltaic installations," *Sol. Energy*, vol. 83, no. 7, pp. 1026–1039, 2009.
- [23] Y. Du, D. D.-C. Lu, G. James, and D. J. Cornforth, "Modeling and analysis of current harmonic distortion from grid connected PV inverters under different operating conditions," *Sol. Energy*, vol. 94, pp. 182–194, 2013.
- [24] T. Taylor, O. Gonzalez, and Y. Baghzouz, "Analysis of current distortion in a 12 kW photovoltaic system installation," *Proc. Int. Conf. Harmon. Qual. Power, ICHQP*, Dec. 2016, pp.243-248.
- [25] A. Bhowmik, A. Maitra, S. M. Halpin, and J. E. Schatz, "Determination of allowable penetration levels of distributed generation resources based on harmonic limit considerations," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 18, no. 2, pp. 619–624, 2003.
- [26] K. Dartawan, L. Hui, R. Austria, and M. Suehiro, "Harmonics issues that limit solar photovoltaic generation on distribution circuits," in *WREF, Colorado Convention Centre, Denver*, 2012.
- [27] V. R. Pandi, H. H. Zeineldin, W. Xiao, and A. F. Zobaa, "Optimal penetration levels for inverter-based distributed generation considering harmonic limits," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 97, pp. 68–75, 2013.
- [28] S. Sakar, M. E. Balci, S. H. E. A. Aleem, and A. F. Zobaa, "Increasing PV hosting capacity in distorted distribution systems using passive harmonic filtering," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 148, pp. 74–86, 2017.

- [29] F. Z. Peng, "Harmonic sources and filtering approaches," *IEEE Ind. Appl. Mag.*, vol. 7, no. 4, pp. 18–25, 2001.
- [30] S. Das, D. Chatterjee, S. K. Goswami, S. Das, D. Chatterjee, and S. K. Goswami, "A Gravitational Search Algorithm Based Static VAR Compensator Switching Function Optimization Technique for Minimum Harmonic Injection," *Electr. Power Com. Syst.*, vol. 5008, 2015.
- [31] A. Karadeniz and M. E. Balci, "Comparative evaluation of common passive filter types regarding maximization of transformer's loading capability under non-sinusoidal conditions," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 158, pp. 324–334, 2018.
- [32] A. F. Zobaa, "A new approach for voltage harmonic distortion minimization," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 70, no. 3, pp. 253–260, 2004.
- [33] A. Menti, T. Zacharias, and J. Miliadis-Argitis, "Optimal sizing and limitations of passive filters in the presence of background harmonic distortion," *Electr. Eng.*, vol. 91, no. 2, pp. 89–100, 2009.
- [34] P. Zacharia, A. Menti, and T. Zacharias, "Genetic algorithm-based optimal design of shunt compensators in the presence of harmonics," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 78, no. 4, pp. 728–735, 2008.
- [35] M. E. Balci, "Optimal C-type filter design to maximize transformer's loading capability under non-sinusoidal conditions," *Electr. Power Components Syst.*, vol. 42, no. 14, pp. 1565–1575, 2014.
- [36] M. E. Balci and A. D. Karaoglan, "Optimal design of C-type passive filters based on response surface methodology for typical industrial power systems," *Electr. Power Components Syst.*, vol. 41, no. 7, pp. 653–668, 2013.
- [37] A. F. Zobaa, "The optimal passive filters to minimize voltage harmonic distortion at a load bus," *IEEE Trans. power Deliv.*, vol. 20, no. 2, pp. 1592–1597, 2005.
- [38] O. M. Aloquili, A. F. Zobaa, and H. H. Zeineldin, "Power factor correction based on transmission loss minimization with uncertain source harmonics and load characteristics," *Electr. Power Components Syst.*, vol. 37, no. 3, pp. 331–346, 2009.
- [39] H. H. Zeineldin and A. F. Zobaa, "Particle swarm optimization of passive filters for industrial plants in distribution networks," *Electr. Power Components Syst.*, vol. 39, no. 16, pp. 1795–1808, 2011.
- [40] H. Na, H. Lina, W. Jian, and X. Dianguo, "Study on optimal design method for passive power filters set at high voltage bus considering many practical aspects," in *2008 Twenty-Third Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, 2008, pp. 396–401.
- [41] H. Yassami, S. M. R. Rafiei, G. Griva, A. Dastfan, and A. Darabi, "Multi-objective optimum design of passive filters using SPEA and NSGA-II algorithms," in *2009 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*, 2009.
- [42] G. W. Chang, H.-L. Wang, and S.-Y. Chu, "A probabilistic approach for optimal passive harmonic filter planning," *IEEE Trans. power Deliv.*, vol. 22, no. 3, pp. 1790–1798, 2007.

- [43] S.-K. Kim, J.-H. Jeon, C.-H. Cho, E.-S. Kim, and J.-B. Ahn, "Modeling and simulation of a grid-connected PV generation system for electromagnetic transient analysis," *Sol. Energy*, vol. 83, no. 5, pp. 664–678, 2009.
- [44] S. H. E. A. Aleem, M. E. Balci, and S. Sakar, "Effective utilization of cables and transformers using passive filters for non-linear loads," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 71, pp. 344–350, 2015.
- [45] S. H. E. A. Aleem, A. F. Zobaa, M. E. Balci, and S. M. Ismael, "Harmonic Overloading Minimization of Frequency-Dependent Components in Harmonics Polluted Distribution Systems Using Harris Hawks Optimization Algorithm," *IEEE Access*, 2019.
- [46] J. J. Grainger, W. D. Stevenson, and W. D. Stevenson, "Power system analysis," *New Jersey*, 2003.
- [47] S. Herraiz, L. Sainz, and J. Clua, "Review of harmonic load flow formulations," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 18, no. 3, pp. 1079–1087, 2003.
- [48] M. E. Balci, D. Ozturk, O. Karacasu, and M. H. Hocaoglu, "Experimental verification of harmonic load models," in *2008 43rd International Universities Power Engineering Conference*, 2008, pp. 1–4.
- [49] A. L. Amoo, D. M. Said, A. Yusuf, and A. A. M. Zin, "Harmonic power flow in Nigerian Power system with PV site," in *2013 IEEE 7th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO)*, 2013, pp. 319–323.
- [50] I. C. Barutcu and E. Karatepe, "Influence of phasor adjustment of harmonic sources on the allowable penetration level of distributed generation," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 87, pp. 1–15, 2017.
- [51] N. Ghaffarzadeh and H. Sadeghi, "A new efficient BBO based method for simultaneous placement of inverter-based DG units and capacitors considering harmonic limits," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 80, pp. 37–45, 2016.
- [52] B. K. Perera, S. R. Pulikanti, P. Ciufo, and S. Perera, "Simulation model of a grid-connected single-phase photovoltaic system in PSCAD/EMTDC," in *2012 IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON)*, 2012, pp. 1–6.
- [53] B. M. Jesadia, A. B. Balar, and R. K. Detroja, "Analysis of solar energy embeded to distribution grid for active & reactive power supply to grid," in *2017 International Conference on Inventive Systems and Control (ICISC)*, 2017, pp. 1–5.
- [54] N. Kroutikova, C. A. Hernandez-Aramburo, and T. C. Green, "State-space model of grid-connected inverters under current control mode," *IET Electr. Power Appl.*, vol. 1, no. 3, pp. 329–338, 2007.
- [55] D. Baimel, J. Belikov, J. M. Guerrero, and Y. Levron, "Dynamic modeling of networks, microgrids, and renewable sources in the dq0 reference frame: A survey," *Ieee Access*, vol. 5, pp. 21323–21335, 2017.
- [56] T. Orchi, M. Mahmud, and A. Oo, "Generalized dynamical modeling of multiple photovoltaic units in a grid-connected system for analyzing dynamic interactions," *Energies*, vol. 11, no. 2, p. 296, 2018.

- [57] Q. Shi, H. Hu, W. Xu, and J. Yong, “Low-order harmonic characteristics of photovoltaic inverters,” *Int. Trans. Electr. energy Syst.*, vol. 26, no. 2, pp. 347–364, 2016.
- [58] A. Hariri, A. Newaz, and M. O. Faruque, “Open-source python-OpenDSS interface for hybrid simulation of PV impact studies,” *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 11, no. 12, pp. 3125–3133, 2017.
- [59] A. Fröbel and R. Vick, “Chosen aspects for harmonic analysis in distribution networks,” in *22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2013)*, 2013, pp. 1–4.
- [60] A. Chidurala, T. Saha, and N. Mithulananthan, “Harmonic characterization of grid connected PV systems & validation with field measurements,” in *2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, 2015, pp. 1–5.
- [61] R. K. Varma, S. A. Rahman, T. Vanderheide, and M. D. N. Dang, “Harmonic impact of a 20-MW PV solar farm on a utility distribution network,” *IEEE Power Energy Technol. Syst. J.*, vol. 3, no. 3, pp. 89–98, 2016.
- [62] S. Farkoush, C.-H. Kim, and S.-B. Rhee, “THD Reduction of Distribution System Based on ASRFC and HVC Method for SVC under EV Charger Condition for Power Factor Improvement,” *Symmetry (Basel)*, vol. 8, no. 12, p. 156, 2016.
- [63] E. Vasanasong and E. D. Spooner, “The effect of net harmonic currents produced by numbers of the Sydney Olympic Village’s PV systems on the power quality of local electrical network,” in *PowerCon 2000. 2000 International Conference on Power System Technology. Proceedings (Cat. No. 00EX409)*, 2000, vol. 2, pp. 1001–1006.
- [64] A. R. Oliva and J. C. Balda, “A PV dispersed generator: a power quality analysis within the IEEE 519,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 18, no. 2, pp. 525–530, 2003.
- [65] I. T. Papaioannou, A. S. Bouhouras, A. G. Marinopoulos, M. C. Alexiadis, C. S. Demoulias, and D. P. Labridis, “Harmonic impact of small photovoltaic systems connected to the LV distribution network,” in *2008 5th International Conference on the European Electricity Market*, 2008, pp. 1–6.
- [66] A. Menti, T. Zacharias, and J. Miliadis-Argitis, “Harmonic distortion assessment for a single-phase grid-connected photovoltaic system,” *Renew. Energy*, vol. 36, no. 1, pp. 360–368, 2011.
- [67] F. Wang, J. L. Duarte, M. A. M. Hendrix, and P. F. Ribeiro, “Modeling and analysis of grid harmonic distortion impact of aggregated DG inverters,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 26, no. 3, pp. 786–797, 2010.
- [68] Y. Du, D. D. C. Lu, G. James, and D. J. Cornforth, “Modeling and analysis of current harmonic distortion from grid connected PV inverters under different operating conditions,” *Sol. Energy*, vol. 94, pp. 182–194, 2013.
- [69] S. Rogalla, F. Ackermann, N. Bihler, H. Moghadam, and O. Stalter, “Source-driven and resonance-driven harmonic interaction between PV inverters and the grid,” in *2016 IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, 2016, pp. 1399–1404.

- [70] Y. Sun, G. Zhang, W. Xu, and J. G. Mayordomo, "A harmonically coupled admittance matrix model for AC/DC converters," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 22, no. 4, pp. 1574–1582, 2007.
- [71] X. J. Zong, P. A. Gray, and P. W. Lehn, "New metric recommended for IEEE Standard 1547 to limit harmonics injected into distorted grids," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 31, no. 3, pp. 963–972, 2015.
- [72] F. Yahyaie and P. W. Lehn, "Using frequency coupling matrix techniques for the analysis of harmonic interactions," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 31, no. 1, pp. 112–121, 2015.
- [73] A. Božiček, J. Kilter, T. Sarnet, I. Papič, and B. Blažič, "Harmonic Emissions of Power Electronic Devices Under Different Transmission Network Operating Conditions," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 54, no. 5, pp. 5216–5226, 2018.
- [74] M. Fauri, "Harmonic modelling of non-linear load by means of crossed frequency admittance matrix," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 12, no. 4, pp. 1632–1638, 1997.
- [75] A. Karadeniz, M. B. Atsever, A. Köksoy, and O. Öztürk, "Fotovoltaik Dağıtık Üretim Birimleri için Harmonik Modellerin Ölçüm Temelli İstatistiksel Hassasiyet Analizi." *ENRES Conference 2018*, 2018, pp. 28-38.
- [76] R. A. R. Walling *et al.*, "Summary of Distributed Resources Impact on Power Delivery Systems," vol. 23, no. 3, pp. 1636–1644, 2008.
- [77] F. H. Guan, D. M. Zhao, X. Zhang, B. T. Shan, and Z. Liu, "Research on Distributed Generation Technologies and its impacts on Power System," 2009, pp. 1–6.
- [78] M. C. Benhabib, J. M. A. Myrzik, and J. L. Duarte, "Harmonic effects caused by large scale PV installations in LV network," in *2007 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation*, 2007, pp. 1–6.
- [79] R. Viral and D. K. Khatod, "Optimal planning of distributed generation systems in distribution system: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 7, pp. 5146–5165, 2012.
- [80] W. S. Tan, M. Y. Hassan, M. S. Majid, and H. Abdul Rahman, "Optimal distributed renewable generation planning: A review of different approaches," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 18, pp. 626–645, 2013.
- [81] P. Prakash and D. K. Khatod, "Optimal sizing and siting techniques for distributed generation in distribution systems: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 57, pp. 111–130, 2016.
- [82] V. Ravikumar Pandi, H. H. Zeineldin, and W. Xiao, "Allowable DG penetration level considering harmonic distortions," *IECON Proc. (Industrial Electron. Conf.)*, pp. 814–818, 2011.
- [83] V. R. Pandi, H. H. Zeineldin, W. Xiao, and A. F. Zobaa, "Optimal penetration levels for inverter-based distributed generation considering harmonic limits," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 97, pp. 68–75, 2013.
- [84] W. Sun, G. P. Harrison, and S. Z. Djokic, "Distribution network capacity assessment: Incorporating harmonic distortion limits," in *2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2012, pp. 1–7.

- [85] P. M. Almeida, M. H. J. Bollen, P. F. Ribeiro, I. N. Santos, and V. Cuk, "Considerations on hosting capacity for harmonic distortions on transmission and distribution systems," vol. 119, pp. 199–206, 2015.
- [86] I. N. Santos, V. Cuk, P. M. Almeida, M. H. J. Bollen, and P. F. Ribeiro, "Considerations on hosting capacity for harmonic distortions on transmission and distribution systems," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 119, pp. 199–206, 2015.
- [87] M. H. Hocaoglu, A. Balıkcı, and M. E. Balcı, "Harmonikli sistemlerde güç akışı için yeni bir yük modeli," *TUBİTAK 1001 Projesi*, p. Proje No: 106E132, 2007-2009., 2009.
- [88] A. F. A. Kadir, A. Mohamed, H. Shareef, and M. Z. C. H. E. WANIK, "Optimal placement and sizing of distributed generations in distribution systems for minimizing losses and THD_v using evolutionary programming," *Turkish J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 21, no. Sup. 2, pp. 2269–2282, 2013.
- [89] A. S. Asok, "Multi objective optimal siting and sizing of inverter based distributed generation units considering harmonic limits in meshed electric power system," *IJAICT*, vol. 1, pp. 25–30, 2014.
- [90] S. Mirjalili and A. Lewis, "The Whale Optimization Algorithm," *Adv. Eng. Softw.*, vol. 95, pp. 51–67, 2016.

EKLER

EKLER

EK A: THDV minimizasyon temelli yaklaşıma göre optimal FDÜB ve PF planlama kodları

EK A.1: HEA-HAK algoritma-model çifti dikkate alınarak hazırlanan kodlar

```
function[OUT,THDV_hak_hp,VI_hak_hp,Vh_hak_hp]=HP_HAK(Filter_buses,Constant_c_buses,HarmBusNL,HarmBusDG,H_DG,H_NL,data_source,IN,Qc_sabit,S_max_DG,Total_QCfiltre_max)
DG_Number=length(HarmBusDG);
Filter_number=length(Filter_buses);
DG_pow_hak=IN([1:DG_Number]);
Qc_filtre_hak=IN([DG_Number+1:DG_Number+Filter_number]);
h_tuned_hak=IN([DG_Number+Filter_number+1:end]);
[ep, busnum, basemva, basevoltage, busdat, linedat]=DSFRead(data_source);
for C_h=1:length(Constant_c_buses);
busdat(Constant_c_buses(C_h),2)=2;
busdat(Constant_c_buses(C_h),13)=Qc_sabit(C_h)+busdat(Constant_c_buses(C_h),13);
end
for DG_h=1:length(HarmBusDG);
busdat(HarmBusDG(DG_h),2)=4;
busdat(HarmBusDG(DG_h),7)=-DG_pow_hak(DG_h);
end
for NL_h=1:length(HarmBusNL);
busdat(HarmBusNL(NL_h),2)=8;
end
for Filter_h=1:length(Filter_buses);
busdat(Filter_buses(Filter_h),2)=5;
busdat(Filter_buses(Filter_h),13)=Qc_filtre_hak(Filter_h)+busdat(Filter_buses(Filter_h),13); % Qc ye ekleniyor Qcfiltre;
end
```



```

Results=LFThukaramx(ep, busnum, basemva, basevoltage, busdat, linedat);
BusTypes=busdat(:,2);
Vbus=Results{2}. *exp(1i*Results{3}*pi/180);
Sload=Results{5}/basemva
Zload=abs(Vbus).^2./conj(Sload);
for Bnl=1:length(HarmBusDG);
IHarmBus_f(HarmBusDG(Bnl))=conj(Sload(HarmBusDG(Bnl))/Vbus(HarmBusDG(Bnl)));
end
for Bnl=1:length(HarmBusNL);
IHarmBus_f(HarmBusNL(Bnl))=conj(Sload(HarmBusNL(Bnl))/Vbus(HarmBusNL(Bnl)));
end
Vh=zeros(20,33);
Vh(1,:)=Vbus.';
hmodel=H_NL(:,1);
for k=1:length(hmodel);
h=hmodel(k); %harmonik numarasi girildi
Ih=zeros(33,1);
for b=1:length(HarmBusNL
Ih(HarmBusNL(b))=abs(IHarmBus_f(HarmBusNL(b))) *H_NL(k,2)*exp(1i*H_NL(k,3)*pi/
180); %Harmonikli baradan enjekte edilecek akim hesaplaniyor.
end
for b=1:length(HarmBusDG);%DG ler icin HAK modele ait h. harmonik akim kaynagi
update
ediliyorIh(HarmBusDG(b))=abs(IHarmBus_f(HarmBusDG(b))) *H_DG(k,2)*exp(1i*H_D
G(k,3)*pi/180);
end
Zbus =
BuildZbusHak(BusTypes,linedat,Vbus,Zload,busnum,h,Qc_sabit,h_tuned_hak,Qc_filtre_ha
k,Filter_buses,Constant_c_buses);
Vh(h,:)=Zbus*Ih;
end
for i=1:busnum; %THD Hesabi yapiliyor
THDV_hak_hp(i)=sqrt(sum(abs(Vh(2:end,i)).^2))*100/abs(Vh(1,i));
end

```

```

V1_hak_hp(:)=abs(Vh(1,:));
Vh_hak_hp=zeros(20,33);
Vh_hak_hp(1,:)=abs(Vh(1,:));
for i=1:busnum;
Vh_hak_hp(2:end,i)=abs(Vh(2:end,i))*100./abs(Vh(1,i));
end
if (max(V1_hak_hp)>1.1)||((max(V1_hak_hp)<0.9)||((max(h_tuned_hak)>20)
OUT=100000;
else
OUT=abs(max(THDV_hak_hp));
end
end

```

EK A.2: HEA-NED algoritma-model çifti dikkate alınarak hazırlanan kodlar

```

function[OUT,THDV_ned_hp,V1_ned_hp,Vh_ned_hp]=HP_NED(Filter_buses,Constant_
c_buses,HarmBusNL,HarmBusDG,H_DG,H_NL,data_source,IN,Qc_sabit,S_max_DG,Tot
al_QCfiltre_max)
DG_Number=length(HarmBusDG);
Filter_number=length(Filter_buses);
DG_pow_ned=IN([1:DG_Number]);
Qc_filtre_ned=IN([DG_Number+1:DG_Number+Filter_number]);
h_tuned_ned=IN([DG_Number+Filter_number+1:end]);
IN_DG=dlmread('IN_DG.txt');
ZN_DG=dlmread('ZN_DG.txt');
IN_NL=dlmread('IN_NL.txt'); %NL'ye ait INh elde okunuyor
ZN_NL=dlmread('ZN_NL.txt'); %NL'ye ait ZNh elde okunuyor
[ep, busnum, basemva, basevoltage, busdat, linedat]=DSFRead(data_source);
for C_h=1:length(Constant_c_buses);
busdat(Constant_c_buses(C_h),2)=2;
busdat(Constant_c_buses(C_h),13)=Qc_sabit(C_h)+ busdat(Constant_c_buses(C_h),13);
end
for DG_h=1:length(HarmBusDG);
busdat(HarmBusDG(DG_h),7)=-DG_pow_ned(DG_h);

```

```

busdat(HarmBusDG(DG_h),2)=4;
end
for NL_h=1:length(HarmBusNL);
busdat(HarmBusNL(NL_h),2)=8;
end
for Filter_h=1:length(Filter_buses);
busdat(Filter_buses(Filter_h),13)=Qc_filtre_ned(Filter_h)+busdat(Filter_buses(Filter_h),
13); % Qc ye ekleniyor Qcfiltre;
busdat(Filter_buses(Filter_h),2)=5;
end
Results=LFThukaramx(ep, busnum, basemva, basevoltage, busdat, linedat
BusTypes=busdat(:,2);
Vbus=Results{2}.*exp(1i*Results{3}*pi/180);
Sload=Results{5}/basemva;%Baralara bagli yuklerin gorunur guclerinin pu degerleri
hesaplan?yor
Zload=abs(Vbus).^2./conj(Sload);
for Bnl=1:length(HarmBusDG);
IHarmBus_f(HarmBusDG(Bnl))=abs(Sload(HarmBusDG(Bnl))/Vbus(HarmBusDG(Bnl)));
ZHarmBus_f(HarmBusDG(Bnl))=abs(Vbus(HarmBusDG(Bnl)))^2/abs(Sload(HarmBusD
G(Bnl)));
end
for Bnl=1:length(HarmBusNL);
IHarmBus_f(HarmBusNL(Bnl))=abs(Sload(HarmBusNL(Bnl))/Vbus(HarmBusNL(Bnl)));
ZHarmBus_f(HarmBusNL(Bnl))=abs(Vbus(HarmBusNL(Bnl)))^2/abs(Sload(HarmBusNL(
Bnl)));
end
Vh=zeros(20,33);
Vh(1,:)=Vbus.';
hmodel=IN_DG(:,1);
for k=1:length(hmodel)
h=hmodel(k);%harmonik numarasi girildi
IN_h=zeros(33,1);
for Bnl=1:length(HarmBusDG);

```

```

IN_h(HarmBusDG(Bnl),1)=abs(IHarmBus_f(HarmBusDG(Bnl)))*IN_DG(k,2)*exp(1i*IN
_DG(k,3)*pi/180);
ZN_h(HarmBusDG(Bnl),1)=abs(ZHarmBus_f(HarmBusDG(Bnl)))*ZN_DG(k,2)*exp(1i*Z
N_DG(k,3)*pi/180);
end
for Bnl=1:length(HarmBusNL);
IN_h(HarmBusNL(Bnl),1)=abs(IHarmBus_f(HarmBusNL(Bnl)))*IN_NL(k,2)*exp(1i*IN_
NL(k,3)*pi/180);
ZN_h(HarmBusNL(Bnl),1)=abs(ZHarmBus_f(HarmBusNL(Bnl)))*ZN_NL(k,2)*exp(1i*ZN
_NL(k,3)*pi/180);
end
Zbus =
BuildZbusNED(BusTypes,linedat,Vbus,Zload,busnum,h,Qc_sabit,h_tuned_ned,Qc_filtre_n
ed,Filter_buses,Constant_c_buses,ZN_h);
Vh(h,:)=(Zbus*IN_h).'; end
for i=1:busnum; THDV_ned_hp(i)=sqrt(sum(abs(Vh(2:end,i)).^2))*100/abs(Vh(1,i));
end
V1_ned_hp(:)=abs(Vh(1,:));% Bara temel harmonik gerilimleri ataniyor
Vh_ned_hp=zeros(20,33);
Vh_ned_hp(1,:)=abs(Vh(1,:));
for i=1:busnum;
Vh_ned_hp(2:end,i)=abs(Vh(2:end,i))*100./abs(Vh(1,i));
end
if (max(V1_ned_hp)>1.1)|| (max(V1_ned_hp)<0.9)|| (max(h_tuned_ned)>20)
OUT=100000;
else
OUT=abs(max(THDV_ned_hp));
end
end

```

EK A.3: THGA-HAK algoritma-model çifti dikkate alınarak hazırlanan kodlar

```
function[OUT,THDV_hak_thga,V1_hak_thga,Vh_hak_thga]=THGA_HAK(Filter_buses,C
onstant_c_buses,HarmBusNL,HarmBusDG,H_DG,H_NL,data_source,IN,Qc_sabit,S_max
_DG>Total_QCfiltre_max)
DG_Number=length(HarmBusDG);
Filter_number=length(Filter_buses);
DG_pow_thga_hak=IN([1:DG_Number]);
Qc_filtre_thga_hak=IN([DG_Number+1:DG_Number+Filter_number]);
h_tuned_thga_hak=IN([DG_Number+Filter_number+1:end]);
Vh=zeros(20,33);
eps=1;%hata degeri
iter=0;%iterasyon sayisi
VbusRMS=ones(1,33);
IsNotConverged=0
while eps>0.00001;
hmodel=H_NL(:,1
iter=iter+1;%iterasyon sayaci
VbusRMS_old=VbusRMS
[ep, busnum, basemva, basevoltage, busdat, linedat]=DSFRead(data_source);
for C_h=1:length(Constant_c_buses
busdat(Constant_c_buses(C_h),2)=2;
busdat(Constant_c_buses(C_h),13)=Qc_sabit(C_h)+ busdat(Constant_c_buses(C_h),13);
end
for DG_h=1:length(HarmBusDG);
busdat(HarmBusDG(DG_h),7)=-DG_pow_thga_hak(DG_h);
busdat(HarmBusDG(DG_h),2)=4;
end
for NL_h=1:length(HarmBusNL); % Kac tane Nonlinear load var
busdat(HarmBusNL(NL_h),2)=8;
end
for Filter_h=1:length(Filter_buses);
busdat(Filter_buses(Filter_h),13)=Qc_filtre_thga_hak(Filter_h)+busdat(Filter_buses(Filt
er_h),13);% Qc ye ekleniyor Qcfiltre;
```

```

busdat(Filter_buses(Filter_h),2)=5;
end
Results=LFTThukaram_1Loopx(basemva, basevoltage, busdat, linedat);
BusTypes=busdat(:,2);
Vbus=Results{2}. *exp(1i*Results{3}*pi/180);
Sload=Results{5}/basemva;
Zload=abs(Vbus).^2./abs(Sload
for Bnl=1:length(HarmBusDG);
IHarmBus_f(HarmBusDG(Bnl))=conj(Sload(HarmBusDG(Bnl))/Vbus(HarmBusDG(Bnl)))
;
end
for Bnl=1:length(HarmBusNL);
IHarmBus_f(HarmBusNL(Bnl))=conj(Sload(HarmBusNL(Bnl))/Vbus(HarmBusNL(Bnl)));
end
for k=1:length(hmodel)
h=hmodel(k);% harmonik numaras? girildi
Ih=zeros(33,1);
for b=1:length(HarmBusNL);
Ih(HarmBusNL(b))=abs(IHarmBus_f(HarmBusNL(b)))*H_NL(k,2)*exp(1i*H_NL(k,3)*pi/
180);
end
for b=1:length(HarmBusDG);
Ih(HarmBusDG(b))=abs(IHarmBus_f(HarmBusDG(b)))*H_DG(k,2)*exp(1i*H_DG(k,3)*
pi/180);
end
Zbus
BuildZbusHak(BusTypes,linedat,Vbus,Zload,busnum,h,Qc_sabit,h_tuned_thga_hak,Qc_filt
re_thga_hak,Filter_buses,Constant_c_buses);
Vh(h,:)=Zbus*Ih; % Bara gerilim harmonikleri hesaplaniyor
end
Vh(1,:)=Vbus.';
for i=1:busnum;
VbusRMS(i)=sqrt(sum(abs(Vh(:,i)).^2));
end

```

```

diff=abs(VbusRMS-VbusRMS_old);% Blunun rms bara gerilimi ile bir ?nceki rms bara
gerilimleri aras?ndaki mutlak fark hesaplaniyor
eps=max(diff);%maksimum fark bulunuyor
epsi(iter)=eps;
if(iter>500)%iterasyon sayisi sinirlaniyor
fprintf('Genel Iterasyon yak?nsamad?\n');
IsNotConverged=1;
break;
end
end
for i=1:busnum;
THDV_hak_thga(i)=sqrt(sum(abs(Vh(2:end,i)).^2))*100/abs(Vh(1,i));
end
V1_hak_thga(:)=abs(Vh(1,:));% Bara temel harmonik gerilimleri ataniyor
Vh_hak_thga=zeros(20,33);
Vh_hak_thga(1,:)=abs(Vh(1,:));
for i=1:busnum;
Vh_hak_thga(2:end,i)=abs(Vh(2:end,i))*100./abs(Vh(1,i));
end
if (max(V1_hak_thga)>1.1)||((max(V1_hak_thga)<0.9)||((max(h_tuned_thga_hak)>20)
OUT=100000;
else
OUT=abs(max(THDV_hak_thga));
end
end

```

EK A.4: THGA-NED algoritma-model çifti dikkate alınarak hazırlanan kodlar

```

function[OUT,THDV_ned_thga,V1_ned_thga,Vh_ned_thga]=THGA_NED(Filter_buses,C
onstant_c_buses,HarmBusNL,HarmBusDG,H_DG,H_NL,data_source,IN,Qc_sabit,S_max
_DG>Total_QCfiltre_max)
DG_Number=length(HarmBusDG);
Filter_number=length(Filter_buses);
DG_pow_thga_ned= IN([1:DG_Number]);

```

```

Qc_filtre_thga_ned=IN([DG_Number+1:DG_Number+Filter_number]);
h_tuned_thga_ned=IN([DG_Number+Filter_number+1:end]);
Vh=zeros(20,33);
eps=1;
iter=0;

VbusRMS=ones(1,33);
IsNotConverged=0
while eps>0.00001;
iter=iter+1;
VbusRMS_old=VbusRMS
IN_DG=dlmread('IN_DG.txt'); %DG'ye ait INh elde okunuyor
ZN_DG=dlmread('ZN_DG.txt'); %DG'ye ait ZNh elde okunuyor
IN_NL=dlmread('IN_NL.txt'); %NL'ye ait INh elde okunuyor
ZN_NL=dlmread('ZN_NL.txt'); %NL'ye ait ZNh elde okunuyor
hmodel=IN_DG(:,1); %modelin icerdigi harmonik numaralar? okunuyor
[ep, busnum, basemva, basevoltage, busdat, linedat]=DSFRead(data_source);
for C_h=1:length(Constant_c_buses);
busdat(Constant_c_buses(C_h),2)=2;
busdat(Constant_c_buses(C_h),13)=Qc_sabit(C_h)+ busdat(Constant_c_buses(C_h),13);
end
for DG_h=1:length(HarmBusDG);
busdat(HarmBusDG(DG_h),7)=-DG_pow_thga_ned(DG_h);
busdat(HarmBusDG(DG_h),2)=4;
end
for NL_h=1:length(HarmBusNLbusdat(HarmBusNL(NL_h),2)=8;
end
for Filter_h=1:length(Filter_buses);
busdat(Filter_buses(Filter_h),13)=Qc_filtre_thga_ned(Filter_h)+busdat(Filter_buses(Filter_h),13);
busdat(Filter_buses(Filter_h),2)=5;
end
Results=LFThukaram_1Loopx(basemva, basevoltage, busdat, linedat);
BusTypes=busdat(:,2);

```



```

Vbus=Results{2}. *exp(1i*Results{3}*pi/180);
Sload=Results{5}/basemva;
Zload=abs(Vbus).^2./abs(Sload);
for Bnl=1:length(HarmBusDG);
IHarmBus_f(HarmBusDG(Bnl))=abs(Sload(HarmBusDG(Bnl))/Vbus(HarmBusDG(Bnl)));
ZHarmBus_f(HarmBusDG(Bnl))=abs(Vbus(HarmBusDG(Bnl)))^2/abs(Sload(HarmBusDG(Bnl)));
end
for Bnl=1:length(HarmBusNL);
IHarmBus_f(HarmBusNL(Bnl))=abs(Sload(HarmBusNL(Bnl))/Vbus(HarmBusNL(Bnl)));
ZHarmBus_f(HarmBusNL(Bnl))=abs(Vbus(HarmBusNL(Bnl)))^2/abs(Sload(HarmBusNL(Bnl)));
end
for k=1:length(hmodel)
h=hmodel(k);
IN_h=zeros(33,1);
for Bnl=1:length(HarmBusDG);
IN_h(HarmBusDG(Bnl),1)=abs(IHarmBus_f(HarmBusDG(Bnl)))*IN_DG(k,2)*exp(1i*IN_DG(k,3)*pi/180);
ZN_h(HarmBusDG(Bnl),1)=abs(ZHarmBus_f(HarmBusDG(Bnl)))*ZN_DG(k,2)*exp(1i*ZN_DG(k,3)*pi/180);
end
for Bnl=1:length(HarmBusNL);%Nonlineer yukler icin Norton modele ait h. harmonik akim kaynagi ve empedans update ediliyor
IN_h(HarmBusNL(Bnl),1)=abs(IHarmBus_f(HarmBusNL(Bnl)))*IN_NL(k,2)*exp(1i*IN_NL(k,3)*pi/180);
ZN_h(HarmBusNL(Bnl),1)=abs(ZHarmBus_f(HarmBusNL(Bnl)))*ZN_NL(k,2)*exp(1i*ZN_NL(k,3)*pi/180);
end
Zbus =
BuildZbusNED(BusTypes,linedat,Vbus,Zload,busnum,h,Qc_sabit,h_tuned_thga_ned,Qc_filtre_thga_ned,Filter_buses,Constant_c_buses,ZN_h); %h. harmonik icin Zbus hesaplaniyor
Vh(h,:)=(Zbus*IN_h).'; % Bara gerilim harmonikleri hesaplaniyor
end

```

```

Vh(1,:)=Vbus.%; % Bara temel harmonik gerilimi Vh'a ataniyor
for i=1:busnum;
VbusRMS(i)=sqrt(sum(abs(Vh(:,i)).^2));
end

diff=abs(VbusRMS-VbusRMS_old);
eps=max(diff);
epsi(iter)=eps;
if(iter>500)
fprintf('Genel Iterasyon yak?nsamad?\n');
IsNotConverged=1;
break;
end
end
for i=1:busnum; %THD Hesabi yapiliyor
THDV_ned_thga(i)=sqrt(sum(abs(Vh(2:end,i)).^2))*100/abs(Vh(1,i));
end
V1_ned_thga(:)=abs(Vh(1,:));
Vh_ned_thga=zeros(20,33);
Vh_ned_thga(1,:)=abs(Vh(1,:));
for i=1:busnum;
Vh_ned_thga(2:end,i)=abs(Vh(2:end,i))*100./abs(Vh(1,i));
end
if (max(V1_ned_thga)>1.1)||((max(V1_ned_thga)<0.9)||((max(h_tuned_thga_ned)>20)
OUT=100000;
else
OUT=abs(max(THDV_ned_thga));
end
end

```

**EK B: Gerilim profili ve FDÜB barındırma kapasitesi en iyileştirme temelli
yaklaşımına göre optimal FDÜB ve PF planlama kodları**

EK B.1: HEA-HAK algoritma-model çifti dikkate alınarak hazırlanan kodlar

```
function
[OUT,THDV_hak_hp,Vl_hak_hp,Vh_hak_hp]=HP_HAK(Filter_buses,Constant_c_buses,
HarmBusNL,HarmBusDG,H_DG,H_NL,data_source,IN,Qc_sabit,S_max_DG>Total_QCfil
tre_max)
DG_Number=length(HarmBusDG);
Filter_number=length(Filter_buses);

DG_pow_hak=IN([1:DG_Number]);
Qc_filtre_hak=IN([DG_Number+1:DG_Number+Filter_number]);
h_tuned_hak=IN([DG_Number+Filter_number+1:end]);
[ep, busnum, basemva, basevoltage, busdat, linedat]=DSFRead(data_source);
for C_h=1:length(Constant_c_buses);
busdat(Constant_c_buses(C_h),2)=2;
busdat(Constant_c_buses(C_h),13)=Qc_sabit(C_h)+
busdat(Constant_c_buses(C_h),13);end
for DG_h=1:length(HarmBusDG); % Kac tane dg var
busdat(HarmBusDG(DG_h),2)=4;
busdat(HarmBusDG(DG_h),7)=-DG_pow_hak(DG_h);
end
for NL_h=1:length(HarmBusNL); % Kac tane Nonlinear load var
busdat(HarmBusNL(NL_h),2)=8;
end
for Filter_h=1:length(Filter_buses);
busdat(Filter_buses(Filter_h),2)=5;
busdat(Filter_buses(Filter_h),13)=Qc_filtre_hak(Filter_h)+busdat(Filter_buses(Filter_h),
13);
end
Results=LFThukaramx(ep, busnum, basemva, basevoltage, busdat, linedat);
BusTypes=busdat(:,2);
Vbus=Results{2}. *exp(1i*Results{3}*pi/180);
Sload=Results{5}/basemva;
Zload=abs(Vbus).^2./conj(Sload);
for Bnl=1:length(HarmBusDG); % DG lerin temel harmonik akimi hesaplaniyor
IHarmBus_f(HarmBusDG(Bnl))=conj(Sload(HarmBusDG(Bnl)))/Vbus(HarmBusDG(Bnl));
;
end
for Bnl=1:length(HarmBusNL
IHarmBus_f(HarmBusNL(Bnl))=conj(Sload(HarmBusNL(Bnl)))/Vbus(HarmBusNL(Bnl));
end
Vh=zeros(20,33);
Vh(1,:)=Vbus.';
hmodel=H_NL(:,1);
for k=1:length(hmodel);
```

```

h=hmodel(k);
Ih=zeros(33,1);
for b=1:length(HarmBusNL);%Nonlinear yukler icin HAK modele ait h. harmonik akim
kaynagi update ediliyor
Ih(HarmBusNL(b))=abs(IHarmBus_f(HarmBusNL(b)))*H_NL(k,2)*exp(1i*H_NL(k,3)*pi/
180);%Harmonikli baradan enjekte edilecek akim hesaplaniyor.
end
for b=1:length(HarmBusDG);%DG ler icin HAK modele ait h. harmonik akim kaynagi
update ediliyor
Ih(HarmBusDG(b))=abs(IHarmBus_f(HarmBusDG(b)))*H_DG(k,2)*exp(1i*H_DG(k,3)*
pi/180);%Harmonikli baradan enjekte edilecek akim hesaplaniyor.
end
Zbus =
BuildZbusHak(BusTypes,linedat,Vbus,Zload,busnum,h,Qc_sabit,h_tuned_hak,Qc_filtre_ha
k,Filter_buses,Constant_c_buses);%h. harmonik icin Zbus hesaplaniyor
Vh(h,:)=Zbus*Ih;% Bara gerilim harmonikleri hesaplaniyor
end
for i=1:busnum;
THDV_hak_hp(i)=sqrt(sum(abs(Vh(2:end,i)).^2))*100/abs(Vh(1,i));
end
V1_hak_hp(:)=abs(Vh(1,:));% Bara temel harmonik gerilimleri ataniyor
Vh_hak_hp=zeros(20,33);
Vh_hak_hp(1,:)=abs(Vh(1,:));
for i=1:busnum;
Vh_hak_hp(2:end,i)=abs(Vh(2:end,i))*100./abs(Vh(1,i));
end
if (max(V1_hak_hp)>1.1)||((max(V1_hak_hp)<0.9)||((max(h_tuned_hak)>20)
OUT=100000;
else
OUT=
0.487*abs(max(THDV_hak_hp))+0.234*(1/(sum(DG_pow_hak)/S_max_DG))+0.71727*s
qrt(sum((V1_hak_hp-1).^2)/33);
end
end

```

EK B.2: HEA-NED algoritma-model çifti dikkate alınarak hazırlanan kodlar

```

function
[OUT,THDV_ned_hp,V1_ned_hp,Vh_ned_hp]=HP_NED(Filter_buses,Constant_c_buses,
HarmBusNL,HarmBusDG,H_DG,H_NL,data_source,IN,Qc_sabit,S_max_DG>Total_QCfil
tre_max)
DG_Number=length(HarmBusDG);
Filter_number=length(Filter_buses);
DG_pow_ned=IN([1:DG_Number]);
Qc_filtre_ned=IN([DG_Number+1:DG_Number+Filter_number]);

```

```

h_tuned_ned=IN([DG_Number+Filter_number+1:end]);
IN_DG=dlmread('IN_DG.txt'); %DG'ye ait INh elde okunuyor
ZN_DG=dlmread('ZN_DG.txt'); %DG'ye ait ZNh elde okunuyor
IN_NL=dlmread('IN_NL.txt'); %NL'ye ait INh elde okunuyor
ZN_NL=dlmread('ZN_NL.txt'); %NL'ye ait ZNh elde okunuyor
[ep, busnum, basemva, basevoltage, busdat, linedat]=DSFRead(data_source);

for C_h=1:length(Constant_c_buses); busdat(Constant_c_buses(C_h),2)=2;
busdat(Constant_c_buses(C_h),13)=Qc_sabit(C_h)+ busdat(Constant_c_buses(C_h),13);
end
for DG_h=1:length(HarmBusDG);
busdat(HarmBusDG(DG_h),7)=-DG_pow_ned(DG_h);
busdat(HarmBusDG(DG_h),2)=4;
end
for NL_h=1:length(HarmBusNL);
busdat(HarmBusNL(NL_h),2)=8;
end
for Filter_h=1:length(Filter_buses);
busdat(Filter_buses(Filter_h),13)=Qc_filtre_ned(Filter_h)+busdat(Filter_buses(Filter_h),
13);
busdat(Filter_buses(Filter_h),2)=5;
end
Results=LFThukaramx(ep, busnum, basemva, basevoltage, busdat, linedat);
BusTypes=busdat(:,2);
Vbus=Results{2}. *exp(1i*Results{3}*pi/180);
Sload=Results{5}/basemva;
Zload=abs(Vbus).^2./conj(Sload);
for Bnl=1:length(HarmBusDG);
IHarmBus_f(HarmBusDG(Bnl))=abs(Sload(HarmBusDG(Bnl))/Vbus(HarmBusDG(Bnl)));
ZHarmBus_f(HarmBusDG(Bnl))=abs(Vbus(HarmBusDG(Bnl)))^2/abs(Sload(HarmBusD
G(Bnl)));
end
for Bnl=1:length(HarmBusNL);

```

```

IHarmBus_f(HarmBusNL(Bnl))=abs(Sload(HarmBusNL(Bnl))/Vbus(HarmBusNL(Bnl)));
ZHarmBus_f(HarmBusNL(Bnl))=abs(Vbus(HarmBusNL(Bnl)))^2/abs(Sload(HarmBusNL(
Bnl)));
end
Vh=zeros(20,33);
Vh(1,:)=Vbus.';
hmodel=IN_DG(:,1);
for k=1:length(hmodel)
h=hmodel(k);
IN_h=zeros(33,1);
for Bnl=1:length(HarmBusDG); %DG ler icin Norton modele ait h. harmonik akim kaynagi
ve empedans update ediliyor
IN_h(HarmBusDG(Bnl),1)=abs(IHarmBus_f(HarmBusDG(Bnl)))*IN_DG(k,2)*exp(1i*I_
DG(k,3)*pi/180);
ZN_h(HarmBusDG(Bnl),1)=abs(ZHarmBus_f(HarmBusDG(Bnl)))*ZN_DG(k,2)*exp(1i*Z
N_DG(k,3)*pi/180);
end
for Bnl=1:length(HarmBusNL);
IN_h(HarmBusNL(Bnl),1)=abs(IHarmBus_f(HarmBusNL(Bnl)))*IN_NL(k,2)*exp(1i*IN_
NL(k,3)*pi/180);
ZN_h(HarmBusNL(Bnl),1)=abs(ZHarmBus_f(HarmBusNL(Bnl)))*ZN_NL(k,2)*exp(1i*ZN
_NL(k,3)*pi/180);
End
Zbus
BuildZbusNED(BusTypes,linedat,Vbus,Zload,busnum,h,Qc_sabit,h_tuned_ned,Qc_filtre_n
ed,Filter_buses,Constant_c_buses,ZN_h); %h. harmonik icin Zbus hesaplaniyor
Vh(h,:)=(Zbus*IN_h).';
end
for i=1:busnum;
THDV_ned_hp(i)=sqrt(sum(abs(Vh(2:end,i)).^2))*100/abs(Vh(1,i));
end
V1_ned_hp(:)=abs(Vh(1,:));
Vh_ned_hp=zeros(20,33);
Vh_ned_hp(1,:)=abs(Vh(1,:));

```

```

for i=1:busnum;
Vh_ned_hp(2:end,i)=abs(Vh(2:end,i))*100./abs(Vh(1,i));
end
if (max(VI_ned_hp)>1.1)||((max(VI_ned_hp)<0.9)||((max(h_tuned_ned)>20)
OUT=100000;
else
OUT=
0.0487*abs(max(THDV_ned_hp))+0.234*(1/(sum(DG_pow_ned)/S_max_DG))+0.71727*
sqrt(sum((VI_ned_hp-1).^2)/33);
end
end

```

EK B.3: THGA-HAK algoritma-model çifti dikkate alınarak hazırlanan kodlar

```

function
[OUT,THDV_hak_thga,VI_hak_thga,Vh_hak_thga]=THGA_HAK(Filter_buses,Constant_
c_buses,HarmBusNL,HarmBusDG,H_DG,H_NL,data_source,IN,Qc_sabit,S_max_DG,Tot
al_QCfiltre_max)
DG_Number=length(HarmBusDG);
Filter_number=length(Filter_buses);
DG_pow_thga_hak=IN([1:DG_Number]);
Qc_filtre_thga_hak=IN([DG_Number+1:DG_Number+Filter_number]);
h_tuned_thga_hak=IN([DG_Number+Filter_number+1:end]);
Vh=zeros(20,33);
eps=1;
iter=0;
VbusRMS=ones(1,33);
IsNotConverged=0;
while eps>0.00001;
hmodel=H_NL(:,1);
iter=iter+1;
VbusRMS_old=VbusRMS;
[ep, busnum, basemva, basevoltage, busdat, linedat]=DSFRead(data_source);
for C_h=1:length(Constant_c_buses);

```

```

busdat(Constant_c_buses(C_h),2)=2;
busdat(Constant_c_buses(C_h),13)=Qc_sabit(C_h)+ busdat(Constant_c_buses(C_h),13);
end
for DG_h=1:length(HarmBusDG);
busdat(HarmBusDG(DG_h),7)=-DG_pow_thga_hak(DG_h);
busdat(HarmBusDG(DG_h),2)=4;
end
for NL_h=1:length(HarmBusNL);
busdat(HarmBusNL(NL_h),2)=8;
end
for Filter_h=1:length(Filter_buses);
busdat(Filter_buses(Filter_h),13)=Qc_filtre_thga_hak(Filter_h)+busdat(Filter_buses(Filter_h),13);
busdat(Filter_buses(Filter_h),2)=5;
end
Results=LFThukaram_1Loopx(basemva, basevoltage, busdat, linedat);
BusTypes=busdat(:,2);
Vbus=Results{2}. *exp(1i*Results{3}*pi/180);
Sload=Results{5}/basemva;
Zload=abs(Vbus).^2./abs(Sload);
for Bnl=1:length(HarmBusDG);
IHarmBus_f(HarmBusDG(Bnl))=conj(Sload(HarmBusDG(Bnl))/Vbus(HarmBusDG(Bnl)))
;
end
for Bnl=1:length(HarmBusNL);
IHarmBus_f(HarmBusNL(Bnl))=conj(Sload(HarmBusNL(Bnl))/Vbus(HarmBusNL(Bnl)));
end
for k=1:length(hmodel)
h=hmodel(k);
Ih=zeros(33,1);
for b=1:length(HarmBusNL);
Ih(HarmBusNL(b))=abs(IHarmBus_f(HarmBusNL(b)))*H_NL(k,2)*exp(1i*H_NL(k,3)*pi/180);
end
end

```



```

for b=1:length(HarmBusDG);
    Ih(HarmBusDG(b))=abs(IHarmBus_f(HarmBusDG(b)))*H_DG(k,2)*exp(1i*H_DG(k,3)*
    pi/180);
end

Zbus
BuildZbusHak(BusTypes,linedat,Vbus,Zload,busnum,h,Qc_sabit,h_tuned_thga_hak,Qc_filt
re_thga_hak,Filter_buses,Constant_c_buses);
Vh(h,:)=Zbus*Ih;
end
Vh(1,:)=Vbus.';
for i=1:busnum;
    VbusRMS(i)=sqrt(sum(abs(Vh(:,i)).^2));
end
diff=abs(VbusRMS-VbusRMS_old);
eps=max(diff);
epsi(iter)=eps;
if(iter>500)
    fprintf('Genel Iterasyon yak?nsamad?\n');
    IsNotConverged=1;
    break;
end
end
for i=1:busnum;
    THDV_hak_thga(i)=sqrt(sum(abs(Vh(2:end,i)).^2))*100/abs(Vh(1,i));
end
V1_hak_thga(:)=abs(Vh(1,:));
Vh_hak_thga=zeros(20,33);
Vh_hak_thga(1,:)=abs(Vh(1,:));
for i=1:busnum;
    Vh_hak_thga(2:end,i)=abs(Vh(2:end,i))*100./abs(Vh(1,i));
end
if (max(V1_hak_thga)>1.1)||((max(V1_hak_thga)<0.9)||((max(h_tuned_thga_hak)>20)
    OUT=100000;

```

```

else
OUT=
0.0487*abs(max(THDV_hak_thga))+0.234*(1/(sum(DG_pow_thga_hak)/S_max_DG))+0.
71727*sqrt(sum((V1_hak_thga-1).^2)/33);
end end

```

EK B.4: THGA-NED algoritma-model çifti dikkate alınarak hazırlanan kodlar

```

function
[OUT,THDV_ned_thga,V1_ned_thga,Vh_ned_thga]=THGA_NED(Filter_buses,Constant_
c_buses,HarmBusNL,HarmBusDG,H_DG,H_NL,data_source,IN,Qc_sabit,S_max_DG,Tot
al_QCfiltre_max)
DG_Number=length(HarmBusDG);
Filter_number=length(Filter_buses);
DG_pow_thga_ned=IN([1:DG_Number]);
Qc_filtre_thga_ned=IN([DG_Number+1:DG_Number+Filter_number]);
h_tuned_thga_ned=IN([DG_Number+Filter_number+1:end]);
Vh=zeros(20,33);
eps=1;
iter=0;
VbusRMS=ones(1,33);
IsNotConverged=0;
while eps>0.00001;
iter=iter+1;
VbusRMS_old=VbusRMS;
IN_DG=dlmread('IN_DG.txt');
ZN_DG=dlmread('ZN_DG.txt');
IN_NL=dlmread('IN_NL.txt');
ZN_NL=dlmread('ZN_NL.txt');
hmodel=IN_DG(:,1);
[ep, busnum, basemva, basevoltage, busdat, linedat]=DSFRead(data_source);
for C_h=1:length(Constant_c_buses);
busdat(Constant_c_buses(C_h),2)=2;
busdat(Constant_c_buses(C_h),13)=Qc_sabit(C_h)+ busdat(Constant_c_buses(C_h),13);
end

```

```

for DG_h=1:length(HarmBusDG);
busdat(HarmBusDG(DG_h),7)=-DG_pow_thga_ned(DG_h);
busdat(HarmBusDG(DG_h),2)=4;
end

for NL_h=1:length(HarmBusNL);
busdat(HarmBusNL(NL_h),2)=8;
end

for Filter_h=1:length(Filter_buses);
busdat(Filter_buses(Filter_h),13)=Qc_filtre_thga_ned(Filter_h)+busdat(Filter_buses(Filter_h),13); % Qc ye ekleniyor Qcfiltre;
busdat(Filter_buses(Filter_h),2)=5;
end

Results=LFTThukaram_1Loopx(basemva, basevoltage, busdat, linedat);
BusTypes=busdat(:,2);
Vbus=Results{2}. *exp(1i*Results{3}*pi/180);
Sload=Results{5}/basemva;
Zload=abs(Vbus).^2./abs(Sload);
for Bnl=1:length(HarmBusDG);
IHarmBus_f(HarmBusDG(Bnl))=abs(Sload(HarmBusDG(Bnl))/Vbus(HarmBusDG(Bnl)));
ZHarmBus_f(HarmBusDG(Bnl))=abs(Vbus(HarmBusDG(Bnl)))^2/abs(Sload(HarmBusDG(Bnl)));
End
for Bnl=1:length(HarmBusNL);
IHarmBus_f(HarmBusNL(Bnl))=abs(Sload(HarmBusNL(Bnl))/Vbus(HarmBusNL(Bnl)));
ZHarmBus_f(HarmBusNL(Bnl))=abs(Vbus(HarmBusNL(Bnl)))^2/abs(Sload(HarmBusNL(Bnl)));
end
for k=1:length(hmodel) %temel harmonik haric diger harmonikler icin bara gerilimleri hesaplaniyor
h=hmodel(k);%harmonik numarasi girildi
IN_h=zeros(33,1); %Baralardan enjekte edilen h. harmonik ak?m vektoru tan?mland?
for Bnl=1:length(HarmBusDG);

```

```

IN_h(HarmBusDG(Bnl),1)=abs(IHarmBus_f(HarmBusDG(Bnl)))*IN_DG(k,2)*exp(1i*IN
_DG(k,3)*pi/180);
ZN_h(HarmBusDG(Bnl),1)=abs(ZHarmBus_f(HarmBusDG(Bnl)))*ZN_DG(k,2)*exp(1i*Z
N_DG(k,3)*pi/180);
end

for Bnl=1:length(HarmBusNL);
IN_h(HarmBusNL(Bnl),1)=abs(IHarmBus_f(HarmBusNL(Bnl)))*IN_NL(k,2)*exp(1i*IN_
NL(k,3)*pi/180);
ZN_h(HarmBusNL(Bnl),1)=abs(ZHarmBus_f(HarmBusNL(Bnl)))*ZN_NL(k,2)*exp(1i*ZN
_NL(k,3)*pi/180);
end

Zbus =
BuildZbusNED(BusTypes,linedat,Vbus,Zload,busnum,h,Qc_sabit,h_tuned_thga_ned,Qc_fil
tre_thga_ned,Filter_buses,Constant_c_buses,ZN_h);
Vh(h,:)=(Zbus*IN_h).';
end
Vh(1,:)=Vbus.';
for i=1:busnum;
VbusRMS(i)=sqrt(sum(abs(Vh(:,i)).^2));
end
diff=abs(VbusRMS-VbusRMS_old);
eps=max(diff);
epsi(iter)=eps;
if(iter>500)
fprintf('Genel Iterasyon yak?nsamad?\n');
IsNotConverged=1;
break;
end
end
for i=1:busnum;
THDV_ned_thga(i)=sqrt(sum(abs(Vh(2:end,i)).^2))*100/abs(Vh(1,i));
end
Vl_ned_thga(:)=abs(Vh(1,:));

```

```

Vh_ned_thga=zeros(20,33);
Vh_ned_thga(1,:)=abs(Vh(1,:));
for i=1:busnum;
Vh_ned_thga(2:end,i)=abs(Vh(2:end,i))*100./abs(Vh(1,i));
end

if (max(VI_ned_thga)>1.1)||((max(VI_ned_thga)<0.9)||((max(h_tuned_thga_ned)>20)
OUT=100000;
else
OUT=
0.0487*abs(max(THDV_ned_thga))+0.234*(1/(sum(DG_pow_thga_ned)/S_max_DG))+0.
71727*sqrt(sum((VI_ned_thga-1).^2)/33);
end
end

```

EK C: Optimal planlama problemlerinin çözümünde kullanılan BO algoritması kodları

```

function[Last_best_Cost,Last_Pos,HarmBusDG_Last,Filter_last]=WOA(Constant_c_buse
s,Filter_candidate_buses,HarmBusNL,DG_candidate_buses,H_DG,H_NL,data_source,M
ax_iter,Pop_size,DG_NUMBER,Filter_number,COST_FUNC,COMbi_DG_Candi_NUM,Q
c_sabit,S_max_DG>Total_QCfiltre_max)
SearchAgents_no=Pop_size;
Last_best_Cost=100000;
for XXX=1:COMbi_DG_Candi_NUM;
HarmBusDG=datasample(DG_candidate_buses,DG_NUMBER,'Replace',false);
Filter_buses=datasample(Filter_candidate_buses,Filter_number,'Replace',false);
dim = DG_NUMBER+Filter_number+Filter_number
ub=
[S_max_DG*ones(1,DG_NUMBER),Total_QCfiltre_max*ones(1,Filter_number),20*ones(
1,Filter_number)];
lb= [zeros(1,DG_NUMBER),zeros(1,Filter_number),2*ones(1,Filter_number)];
Leader_pos=zeros(1,dim);
Leader_score=inf;

```

```

Positions=initialization(SearchAgents_no,dim,ub,lb);
for i=1:Pop_size;
x_DG=Positions(i,1:DG_NUMBER);
x_Qf=Positions(i,DG_NUMBER+1:DG_NUMBER+Filter_number);
x_DG=[];
iii=0;
katsayi=6;
while isempty(x_DG);
iii=iii+1;
if iii>40
katsayi=katsayi/2;
else
end
x_DG= rand(1,DG_NUMBER);
x_DG= x_DG*katsayi;
x_DG(sum(x_DG)>S_max_DG,:) = [];
end
x_Qf=[];
iii=0;
katsayi=6;
while isempty(x_Qf);
iii=iii+1;
if iii>40
katsayi=katsayi/2;
else
end
x_Qf = rand(1,Filter_number);
x_Qf=x_Qf*katsayi;
x_Qf(sum(x_Qf)>Total_QCfiltre_max,:) = [];
end
Positions(i,1:DG_NUMBER)=x_DG;
Positions(i,DG_NUMBER+1:DG_NUMBER+Filter_number)= x_Qf;
end
Convergence_curve=zeros(1,Max_iter);

```

```

t=0;
disp(['-----DG BUSES----- ' num2str(HarmBusDG) '----- ']);
disp(['-----Filter BUSES----- ' num2str(Filter_buses) '----- ']);
while t<Max_iter
for i=1:size(Positions,1)
Positions(i,:) = max(Positions(i,:), lb); %Kucukse limite esitle

if
(sum(Positions(i,1:DG_NUMBER))>S_max_DG)||((sum(Positions(i,1:DG_NUMBER))==0
))
x_DG=[];
iii=0;
katsayi=6;
while isempty(x_DG);
iii=iii+1;
if iii>40
katsayi=katsayi/2;
else
end
x_DG= rand(1,DG_NUMBER);
x_DG= x_DG*katsayi;
x_DG(sum(x_DG)>S_max_DG,:) = [];
end
Positions(i,1:DG_NUMBER)=x_DG;
Positions(i,DG_NUMBER+1:DG_NUMBER+Filter_number)= x_Qf;
else
end
if
(sum(Positions(i,DG_NUMBER+1:DG_NUMBER+Filter_number))>Total_QCfiltre_max
)||((sum(Positions(i,DG_NUMBER+1:DG_NUMBER+Filter_number))==0))
x_Qf=[];
iii=0;
katsayi=6;
while isempty(x_Qf);
iii=iii+1;

```

```

if iii>40
katsayi=katsayi/2;
else
end
x_Qf = rand(1,Filter_number);
x_Qf=x_Qf*katsayi;
x_Qf(sum(x_Qf)>Total_QCfiltre_max,:)= []; end

Positions(i,1:DG_NUMBER)=x_DG;
Positions(i,DG_NUMBER+1:DG_NUMBER+Filter_number)= x_Qf;
else
end

[fitness,THDV_hak_hp,VI_hak_hp,Vh_hak_hp,S_max_DG,Total_QCfiltre_max] =
COST_FUNC(Filter_buses,Constant_c_buses,HarmBusNL,HarmBusDG,H_DG,H_NL,dat
a_source,Positions(i,:),Qc_sabit);
if fitness<Leader_score % Change this to > for maximization problem
Leader_score=fitness; % Update alpha
Leader_pos=Positions(i,:);
end
end
a=2-t*((2)/Max_iter);
a2=-1+t*((-1)/Max_iter);
for i=1:size(Positions,1)
r1=rand(); % r1 is a random number in [0,1]
r2=rand(); % r2 is a random number in [0,1]
A=2*a*r1-a
C=2*r2;
b=1;
l=(a2-1)*rand+1
p = rand();
for j=1:size(Positions,2)
if p<0.5
if abs(A)>=1
rand_leader_index = floor(SearchAgents_no*rand()+1);

```



```

X_rand = Positions(rand_leader_index, :);
D_X_rand=abs(C*X_rand(j)-Positions(i,j));
Positions(i,j)=X_rand(j)-A*D_X_rand;
elseif abs(A)<1
D_Leader=abs(C*Leader_pos(j)-Positions(i,j));
Positions(i,j)=Leader_pos(j)-A*D_Leader;
end
elseif p>=0.5
distance2Leader=abs(Leader_pos(j)-Positions(i,j));
Positions(i,j)=distance2Leader*exp(b.*l).*cos(l.*2*pi)+Leader_pos(j);
end
end
end
disp(['Iteration ' num2str(t) ': Best Cost = ' num2str(Leader_score)]);
t=t+1;
Convergence_curve(t)=Leader_score;
end
if Leader_score < Last_best_Cost
Last_best_Cost=Leader_score;
Last_Pos=Leader_pos;
HarmBusDG_Last=HarmBusDG;
Filter_last=Filter_buses;
else
end
end
end

```

EK D: IEEE 33 baralı test sisteminin hat verileri

Tablo D.1: IEEE 33 baralı test sistemi hat verileri.

| HAT VERİLERİ (IEEE 33) | | | | | |
|------------------------|---------|--------|----------|----------|----------|
| Hat No. | Nereden | Nereye | R(pu) | X(pu) | B(pu) |
| 1 | 1 | 2 | 0.057500 | 0.029300 | 0.000000 |
| 2 | 2 | 3 | 0.307600 | 0.156600 | 0.000000 |
| 3 | 3 | 4 | 0.228400 | 0.116300 | 0.000000 |
| 4 | 4 | 5 | 0.237800 | 0.121100 | 0.000000 |
| 5 | 5 | 6 | 0.511000 | 0.441100 | 0.000000 |
| 6 | 6 | 7 | 0.116800 | 0.386100 | 0.000000 |
| 7 | 7 | 8 | 1.068000 | 0.771000 | 0.000000 |
| 8 | 8 | 9 | 0.642600 | 0.461700 | 0.000000 |
| 9 | 9 | 10 | 0.651400 | 0.461700 | 0.000000 |
| 10 | 10 | 11 | 0.122700 | 0.040600 | 0.000000 |
| 11 | 11 | 12 | 0.233600 | 0.077200 | 0.000000 |
| 12 | 12 | 13 | 0.915900 | 0.720600 | 0.000000 |
| 13 | 13 | 14 | 0.337900 | 0.444800 | 0.000000 |
| 14 | 14 | 15 | 0.368700 | 0.328200 | 0.000000 |
| 15 | 15 | 16 | 0.465600 | 0.340000 | 0.000000 |
| 16 | 16 | 17 | 0.804200 | 1.073800 | 0.000000 |
| 17 | 17 | 18 | 0.456700 | 0.358100 | 0.000000 |
| 18 | 2 | 19 | 0.102300 | 0.097600 | 0.000000 |
| 19 | 19 | 20 | 0.938500 | 0.845700 | 0.000000 |
| 20 | 20 | 21 | 0.255500 | 0.298500 | 0.000000 |
| 21 | 21 | 22 | 0.442300 | 0.584800 | 0.000000 |
| 22 | 3 | 23 | 0.281500 | 0.192400 | 0.000000 |
| 23 | 23 | 24 | 0.560300 | 0.442400 | 0.000000 |
| 24 | 24 | 25 | 0.559000 | 0.437400 | 0.000000 |
| 25 | 6 | 26 | 0.126700 | 0.064500 | 0.000000 |
| 26 | 26 | 27 | 0.177300 | 0.090300 | 0.000000 |
| 27 | 27 | 28 | 0.660700 | 0.582600 | 0.000000 |
| 28 | 28 | 29 | 0.501800 | 0.437100 | 0.000000 |
| 29 | 29 | 30 | 0.316600 | 0.161300 | 0.000000 |
| 30 | 30 | 31 | 0.608000 | 0.600800 | 0.000000 |
| 31 | 31 | 32 | 0.193700 | 0.225800 | 0.000000 |
| 32 | 32 | 33 | 0.212800 | 0.330800 | 0.000000 |

EK E: Harmonik üreten yüklerin (HÜY) harmonik modelleri

Tablo E.1: HÜY'ler için HAK modeli akım verileri.

| Harmonik derecesi | Ih/I1 (genlik) | Açı (derece) |
|-------------------|----------------|--------------|
| 2 | 0.00001 | 0.00001 |
| 3 | 0.2178 | -34.36 |
| 4 | 0.00001 | 0.00001 |
| 5 | 0.1372 | 9.65 |
| 6 | 0.00001 | 0.00001 |
| 7 | 0.1087 | 10.25 |
| 8 | 0.00001 | 0.00001 |
| 9 | 0.0947 | 28.79 |
| 10 | 0.00001 | 0.00001 |
| 11 | 0.0731 | 40.14 |
| 12 | 0.00001 | 0.00001 |
| 13 | 0.0563 | 62.81 |
| 14 | 0.00001 | 0.00001 |
| 15 | 0.0347 | 85.13 |
| 16 | 0.00001 | 0.00001 |
| 17 | 0.0261 | 115.72 |
| 18 | 0.00001 | 0.00001 |
| 19 | 0.0221 | 165.52 |
| 20 | 0.00001 | 0.00001 |

Tablo E.2: HÜY'ler için NED modeli akım verileri.

| Harmonik derecesi | Ih/I1 (genlik) | Açı (derece) |
|-------------------|----------------|--------------|
| 2 | 1e-6 | 0.0001 |
| 3 | 0.2033 | -36.78 |
| 4 | 1e-6 | 0.0001 |
| 5 | 0.0189 | -24.94 |
| 6 | 1e-6 | 0.0001 |
| 7 | 0.23025 | 10.32 |
| 8 | 1e-6 | 0.0001 |
| 9 | 0.0840 | 173.15 |
| 10 | 1e-6 | 0.0001 |
| 11 | 0.09335 | 31.33 |
| 12 | 1e-6 | 0.0001 |
| 13 | 0.09651 | 161.14 |
| 14 | 1e-6 | 0.0001 |
| 15 | 0.05760 | 56.91 |
| 16 | 1e-6 | 0.0001 |
| 17 | 0.0901 | 175.94 |
| 18 | 1e-6 | 0.0001 |
| 19 | 0.1054 | 59.11 |
| 20 | 1e-6 | 0.0001 |

Tablo E.3: HÜY'ler için NED modeli empedans verileri.

| Harmonik derecesi | Ih/I1 (genlik) | Açı (derece) |
|-------------------|----------------|--------------|
| 2 | 1e10 | 0.0001 |
| 3 | 35.8655 | -92.6372 |
| 4 | 1e10 | 0.0001 |
| 5 | 3.9960 | 161.6166 |
| 6 | 1e10 | 0.0001 |
| 7 | 4.785 | 169.5128 |
| 8 | 1e10 | 0.0001 |
| 9 | 2.1575 | 165.9795 |
| 10 | 1e10 | 0.0001 |
| 11 | 5.9373 | 172.2935 |
| 12 | 1e10 | 0.0001 |
| 13 | 3.4157 | 170.7254 |
| 14 | 1e10 | 0.0001 |
| 15 | 1.0019 | 148.7573 |
| 16 | 1e10 | 0.0001 |
| 17 | 2.2345 | 176.0180 |
| 18 | 1e10 | 0.0001 |
| 19 | 1.1683 | 126.7699 |
| 20 | 1e10 | 0.0001 |

EK F: FDÜB'lerin harmonik modelleri

Tablo F.1: FDÜB'ler için HAK modeli akım verileri.

| Harmonik derecesi | Ih/I1 (genlik) | Açı (derece) |
|-------------------|----------------|--------------|
| 2 | 0.0095 | -179.32856 |
| 3 | 0.0036 | 147.733962 |
| 4 | 0.0044 | -168.426093 |
| 5 | 0.0032 | 125.579834 |
| 6 | 0.0001 | 131.495226 |
| 7 | 0.0065 | -63.843713 |
| 8 | 0.0032 | 91.723204 |
| 9 | 0.0039 | 108.836741 |
| 10 | 0.0067 | -91.470086 |
| 11 | 0.0023 | 140.129845 |
| 12 | 0.0004 | -106.927943 |
| 13 | 0.0016 | -4.489493 |
| 14 | 0.001 | 141.374143 |
| 15 | 0.0009 | 40.329415 |
| 16 | 0.0010 | 116.263673 |
| 17 | 0.0010 | -110.622848 |
| 18 | 0.0016 | 31.054834 |
| 19 | 0.001 | -121.087861 |
| 20 | 0.0009 | 177.722988 |

Tablo F.2: FDÜB'ler için NED modeli akım verileri.

| Harmonik derecesi | Ih/I1 (genlik) | Açı (derece) |
|-------------------|----------------|--------------|
| 2 | 0.0077 | 29.9629 |
| 3 | 0.0041 | 98.1144 |
| 4 | 0.0029 | -94.2779 |
| 5 | 0.002 | 78.3827 |
| 6 | 0.0017 | -91.7877 |
| 7 | 0.0071 | -143.155 |
| 8 | 0.004 | -74.7623 |
| 9 | 0.0009 | -44.9671 |
| 10 | 0.0141 | -59.9355 |
| 11 | 0.0031 | -109.837 |
| 12 | 0.0025 | -1.5354 |
| 13 | 0.0048 | 121.7827 |
| 14 | 0.0039 | -7.422 |
| 15 | 0.0024 | 137.0454 |
| 16 | 0.002 | -123.0971 |
| 17 | 0.0032 | 82.0224 |
| 18 | 0.0005 | -58.9869 |
| 19 | 0.002 | -176.3599 |
| 20 | 0.0035 | -174.5073 |

Tablo F.3: FDÜB'ler için NED modeli empedans verileri.

| Harmonik derecesi | Ih/I1 (genlik) | Açı (derece) |
|-------------------|----------------|--------------|
| 2 | 0.2052 | -67.3025 |
| 3 | 1.0836 | -81.1795 |
| 4 | 0.1035 | -91.0896 |
| 5 | 0.7718 | -78.8027 |
| 6 | 0.7481 | 106.2169 |
| 7 | 0.5726 | -45.2859 |
| 8 | 0.2014 | -163.6187 |
| 9 | 1.1891 | -69.5099 |
| 10 | 0.0558 | -22.3722 |
| 11 | 0.4896 | -48.3491 |
| 12 | 0.2949 | -108.5051 |
| 13 | 0.5137 | -33.989 |
| 14 | 0.6037 | 147.1713 |
| 15 | 0.3588 | 157.9065 |
| 16 | 0.3501 | -92.1254 |
| 17 | 0.7145 | -51.8474 |
| 18 | 0.2346 | -107.2411 |
| 19 | 0.3757 | -78.8316 |
| 20 | 0.2012 | -77.8434 |

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Alp KARADENİZ
Doğum tarihi ve yeri : 14/06/1989 - MUĞLA
e-posta : akaradeniz@balikesir.edu.tr

Öğrenim Bilgileri

| Derece | Okul/Program | Yıl |
|-----------|---|------|
| Y. Lisans | Balıkesir Üniversitesi / Elektrik-Elektronik Mühendisliği | 2015 |
| Lisans | Eskişehir Osmangazi Üniversitesi / Elektrik-Elektronik Mühendisliği | 2012 |
| Lise | Muğla Anadolu Lisesi | 2007 |

Yayın Listesi

- 1- Karadeniz A., Balcı M. “Fotovoltaik dağıtık üretim birimleri (FV-DÜB): güç kalitesine etkileri, uluslararası güç kalitesi standartları ve FV-DÜB barındıran dağıtım sistemleri için güç kalitesi iyileştirme yöntemleri.” **Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi**, 21(2), 882-903, 2019.
DOI: 10.25092/baunfbed.654556
- 2- Karadeniz A, Atsever M. B., Köksoy A., Öztürk O., Balcı M. E., Hocaoğlu M. H., “Fotovoltaik Dağıtık Üretim Birimleri için Harmonik Modellerin Ölçüm Temelli İstatistiksel Hassasiyet Analizi.” **ENRES 2018**, 348-358, 2018.