

IEEE 13-Baralı Dengesiz Üç Fazlı Güç Dağıtım Sistemlerinde Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Optimum Konumlandırılması ve Boyutlandırılması

Murat ÇIKAN^{1,a}

¹Çukurova Üniversitesi, AOSB TBMYO, Elektronik Teknolojisi Bölümü, Adana

^aORCID: 0000-0001-6723-5769

Makale Bilgileri

Geliş : 01.01.2025

Kabul : 25.03.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1665868

Sorumlu Yazar

Murat ÇIKAN

mcikan@cu.edu.tr

Anahtar Kelimeler

Ağırlıklı ortalama arama algoritması

Dengesiz güç dağıtım sistemleri

Dağıtık üretim birimleri

Konumlandırma ve boyutlandırma

Yenilenebilir enerji kaynakları

Atf şekli: ÇIKAN, M., (2025). IEEE 13-Baralı Dengesiz Üç Fazlı Güç Dağıtım Sistemlerinde Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Optimum Konumlandırılması ve Boyutlandırılması. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 40(1), 89-98.

ÖZ

Dağıtık üretim birimlerinin güç dağıtım ağlarına optimal entegrasyonu, günümüz enerji sistemlerinin karşılaştığı en kritik tasarım problemlerinden biri olup, sistem verimliliği, performansı ve güç kalitesi üzerinde doğrudan etkiye sahiptir. Bu çalışmada, farklı tipte dağıtık güç üretim birimlerinin optimal konumlandırma ve boyutlandırma probleminin çözümü için yeni bir yaklaşım önerilmektedir. Önerilen yaklaşımın test edilmesi için IEEE-13 baralı üç fazlı dengesiz dağıtım hattı üzerinde Fotovoltaik Paneller (PV, Tip-1), Kapasitör Tank (Tip-2) ve Rüzgâr Türbini (WT-Tip-3) olmak üzere üç farklı dağıtık güç üretim birimi kullanılmıştır. Çalışmada, üç farklı senaryo ve her senaryoda üç farklı durum için analizler gerçekleştirilmiş olup, optimizasyon sürecinde güncel Ağırlıklı Ortalama Optimizasyon Algoritması (AOOA) kullanılmıştır. Yapılan analizler sonucunda, önerilen yöntemin aktif güç kayıplarını %85,75'e kadar azalttığı, gerilim profilini önemli ölçüde iyileştirdiği ve şebekenin güç kalitesini ve performansını kayda değer şekilde artırdığı gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, önerilen yaklaşımın dağıtık üretim birimlerinin entegrasyonunda etkili bir çözüm sunduğunu göstermektedir.

Optimal Placement and Sizing of Renewable Energy Sources in the IEEE 13-Bus Unbalanced Three-Phase Power Distribution System

Article Info

Received : 01.01.2025

Accepted : 25.03.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1665868

Corresponding Author

Murat ÇIKAN

mcikan@cu.edu.tr

Keywords

Weighted average search algorithm

Unbalanced power distribution systems

Distributed generation units

Placement and sizing

Renewable energy sources

How to cite: ÇIKAN, M., (2025). Optimal Placement and Sizing of Renewable Energy Sources in the IEEE 13-Bus Unbalanced Three-Phase Power Distribution System. Çukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 40(1), 89-98.

ABSTRACT

The optimal integration of distributed generation units into power distribution networks represents one of the most critical design challenges in contemporary energy systems, directly impacting system efficiency, performance, and power quality. This study presents an innovative approach for solving the optimal placement and sizing problem of different types of distributed power generation units. To test the proposed approach, three distinct distributed power generation units, Photovoltaic Panels (PV, Type-1), Capacitor Bank (Type-2), and Wind Turbine (WT, Type-3), were employed on an IEEE-13 bus three-phase unbalanced distribution line. The study conducted analyses for three different scenarios, each comprising three different cases, utilizing the current Weighted Mean Optimization Algorithm (WMOA) during the optimization process. The analysis results demonstrate that the proposed method reduces active power losses by up to 85.75%, significantly improves the voltage profile, and notably enhances the network's power quality and performance. These findings indicate that the proposed approach offers an effective solution for the integration of distributed generation units.

1. GİRİŞ

Güç dağıtım ağları (GDA), elektrik enerjisinin üreticiden tüketiciye iletilmesini sağlayan kritik altyapılardır. Son yıllarda artan yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu, değişken güç üretim özellikleri ve yük taleplerindeki dalgalanmalar, GDA'lar için önemli zorluklar yaratmaktadır. Özellikle, elektrikli araçların yaygınlaşması ve enerji talebinin artması, bu ağlar üzerinde ek bir baskı oluşturmaktadır, mevcut altyapının verimli çalışmasını zorlaştırmaktadır [1]. Geleneksel olarak, GDA'ların çalışması dengeli üç fazlı olarak tasarlanmışken, pratikte ise çoğunlukla dengesiz karakteristikler sergileyerek daha karmaşık hale gelmektedir [2]. Bu dengesizlik, tek fazlı yükler, asimetrik hat yapıları ve düzensiz yük dağılımları gibi faktörlerle daha da belirginleşmektedir.

Literatürde, dengeli GDA'larda dağıtık üretim (DÜ) birimlerinin yerleştirilmesi üzerine birçok çalışma yapılmış olup, bu çalışmalar [3,4] makalelerinde özetlenmiştir. Ancak, dengesiz GDA'lar üzerinde yapılan araştırmalar, bu ağların pratikte karşılaşılan zorluklarını göz önünde bulundurarak daha fazla önem kazanmaktadır. Dengesiz GDA'larda, DÜ yerleştirilmesi ve optimizasyonu oldukça karmaşık bir problem haline gelmektedir ve bu alandaki çalışmalar [5] makalesinde detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının (YEK) değişkenliği, fazlar arası dengesizlikler ve düzensiz yük dağılımları, geleneksel optimizasyon yöntemlerinin etkinliğini sınırlamaktadır. Bu nedenle, meta-sezgisel algoritmalar son yıllarda bu tür zorlukların üstesinden gelmek için giderek daha fazla kullanılmaktadır [6-9]. DÜ'lerin GDA'lara optimal şekilde yerleştirilmesi için son yıllarda yapılan bazı çalışmalar şu şekildedir. Balu ve Mukherjee [10] IEEE 33-baralı ve Brezilya 136-baralı test sistemlerinde, elektrikli araç şarj ve pil değiştirme istasyonlarının şebeke üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Optimum yerleşim ve boyutlandırma işlemleri, yenilenebilir enerji kaynakları (fotovoltaik, rüzgâr türbini) ve enerji depolama sistemleriyle birlikte ele alınarak, kaotik öğrenci psikolojisi temelli optimizasyon algoritması kullanılmıştır. Gümüş ve arkadaşları IEEE-69 ve IEEE-118 baralı test sistemlerinde, DÜ birimlerinin optimal yerleşimi ve boyutlandırılmasını, güç kayıplarını azaltmak, gerilim profilini iyileştirmek ve sistem kararlılığını artırmak amacıyla incelemiştir [11]. Problem, çok amaçlı bir yaklaşım çerçevesinde karışık tam sayılı Genetik Algoritma ve Gri Kurt Optimizasyonu ile çözülmüş, DÜ'lerin farklı güç faktörlerindeki reaktif gücü de dikkate alınmıştır. Cikan ve Nacar Cikan üç fazlı 123-baralı dengesiz güç dağıtım ağı üzerinde, üç farklı türdeki DÜ birimlerinin konum, boyut, bağlantı tipi (Δ/Y), ve güç faktörünün optimizasyonu için denge optimizasyon (Equilibrium Optimizer) algoritmasını kullanmıştır [5]. Çalışma, MATLAB ortamında yazılan ve uygulanan bir dengesiz üç fazlı ileri geri yük akış algoritmasıyla gerçekleştirilmiş ve denge optimizasyon algoritmasının üstünlüğü, güç kaybı, gerilim profili iyileştirmesi ve algoritmanın hız ve güvenilirlik gibi performans kriterleri açısından diğer altı optimizasyon algoritmasıyla karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Kandasamy ve arkadaşları [12] optimal DÜ ve DSTATCOM yerleşimi için geliştirilmiş genişletilmiş yapay arı kolonisi (Enhanced Artificial Bee Colony) algoritmasını kullanmıştır. Çalışma, IEEE 13-bara dengesiz ve 33-bara dengeli radyal güç dağıtım ağı test sistemlerinde simülasyonlarla gerçekleştirilmiştir. Pushkarna ve arkadaşları rüzgâr santrallerindeki Tip IV jeneratörlerinin optimal yerleşimi ve boyutlandırılmasını, dengesiz güç dağıtım sistemlerinde reaktif destekle entegrasyonunu ele almıştır [13]. Optimizasyon için partikül sürü optimizasyonu algoritması kullanılmıştır ve sistemdeki güç kaybının minimize edilmesi hedeflenmiştir. Çalışma, IEEE 34 ve 123 düğüm dengesiz test sistemlerinde gerçekleştirilmiştir.

Bu makalede, fotovoltaik (PV), rüzgâr türbini (RT) ve kapasitör tankı (KT) gibi dağıtık üretim birimlerinin güç dağıtım ağlarına entegrasyonu ele alınmıştır. Çalışma kapsamında, IEEE 13-baralı dengesiz dağıtım hattında güç kayıplarını azaltmak ve gerilim profilini iyileştirmek amacıyla bu birimlerin en uygun yerleşimi ve boyutlandırılması üzerine çalışılmıştır. Analizler, DÜ biriminin entegrasyonunu içeren üç farklı senaryo her bir senaryoda ise üç farklı durumu içerecek şekilde gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon sürecinde, Ağırlıklı Ortalama Optimizasyon Algoritması (AOOA) kullanılmıştır. Sonuçlar, önerilen yöntemin aktif güç kayıplarını %85,75 oranında azaltarak ve gerilim profilini iyileştirerek şebeke performansını artırmada etkili olduğunu göstermektedir.

Bu çalışmanın literatüre özgün katkıları ise şu şekilde özetlenebilir:

- Dengesiz üç fazlı dağıtım sistemlerinde farklı yenilenebilir enerji kaynaklarının (YEK) eş zamanlı optimizasyonu için kapsamlı bir metodoloji sunulmuştur.
- Rüzgâr türbinlerinin güç faktörünün optimizasyon parametresi olarak modele dahil edilmesi, bu tür kaynakların etkili entegrasyonu için önemli bir yenilik sunmaktadır.
- IEEE 13-baralı test sisteminde, dengesiz yapıların etkilerini daha ayrıntılı bir şekilde analiz edilmiştir.
- Sistem kayıplarının minimize edilmesi için çok parametrelili bir optimizasyon yaklaşımı geliştirilmiştir.

Bu katkılar, dengesiz GDA'larda YEK entegrasyonunun ve optimizasyonunun daha etkin bir şekilde yapılmasına olanak tanımaktadır.

Makalenin geri kalanı şu şekilde organize edilmiştir: Bölüm 2'de problem formülasyonu ve matematiksel modelleme detaylandırılmakta, sistem bileşenlerinin modellenmesi ve kısıtlar sunulmaktadır. Bölüm 3'te önerilen optimizasyon metodolojisi ve çözüm algoritması açıklanmaktadır. Bölüm 4, simülasyon sonuçlarını ve karşılaştırmalı analizleri içermektedir. Farklı senaryo analizleri ve performans değerlendirmeleri bu bölümde sunularak tartışılmıştır. Son olarak, Bölüm 5'te çalışmanın sonuçları özetlenmektedir.

2. OPTİMİZASYON PROBLEMİNE AİT FORMÜLLER

Bu bölümde, güç dağıtım sistemlerinin optimizasyon problemini tanımlayan matematiksel modelleme ve temel kısıtlamalar açıklanmıştır. Amaç, dağıtım ağının verimliliğini, güvenilirliğini ve genel performansını artırmaktır.

2.1. Kısıtlamalar

Eşitlik 1'de, her bir baradaki (her faz için) gerilim değerlerinin, sistemin güvenilir ve kararlı çalışmasını sağlamak amacıyla tanımlanmış minimum ve maksimum sınırlar arasında olması gerektiğini göstermektedir. Gerilim sınırları, dağıtım sistemindeki gerilim kararlılığını ve ekipman güvenliğini garanti eder.

$$V_{\min}^{A,B,C} \leq V_i^{A,B,C} \leq V_{\max}^{A,B,C} \quad \forall i \in n_{\text{branch}} \quad (1)$$

Eşitlik 2'de, iletim hatlarındaki (her faz için) akım büyüklüklerinin, izin verilen maksimum akım değerini aşmaması gerektiğini belirtmektedir. Bu kısıtlama, ekipmanların güvenli bir şekilde çalışmasını ve sistemdeki aşırı yüklenmelerin önlenmesini sağlamaktadır.

$$I_{ij}^{A,B,C} \leq I_{ij,\max}^{A,B,C} \quad \forall (i,j) \in n_{\text{branch}} \quad (2)$$

Eşitlik 3, güç dengesini tanımlamaktadır. Sistemdeki toplam aktif güç üretiminin, toplam yük talebi ve iletim hatlarındaki güç kayıplarının toplamına eşit olması gerektiğini göstermektedir. Böylece, sistem dengeli bir şekilde çalışır ve enerji arz-talep dengesi sağlanır.

$$\sum_{i \in N} P_i = \sum_{j \in N} (P_j + P_{L,j}) \quad (3)$$

Eşitlik 4'te, transformatörlerin primer ve sekonder taraflarındaki gerilim ve akım değerlerinin, belirlenmiş minimum ve maksimum sınırlar arasında kalması gerektiği belirtilmektedir. Transformatörlerin uygun sınırlar içinde çalışması, aşırı yüklenmeyi önler ve ekipman ömrünü uzatır.

$$\begin{aligned} V_{\min}^{A,B,C} &\leq V_{i,\text{pri}}^{A,B,C}, V_{i,\text{sec}}^{A,B,C} \leq V_{\max}^{A,B,C} \\ I_{i,\text{prim}}^{A,B,C} &\leq I_{i,\text{prim},\max}^{A,B,C} \\ I_{i,\text{sec}}^{A,B,C} &\leq I_{i,\text{sec},\max}^{A,B,C} \end{aligned} \quad (4)$$

Eşitlik 5’te, gerilim regülatörünün kademe ayarına bağlı olarak gerilim değerinin her faz için, minimum ve maksimum sınırlar arasında olması gerektiğini tanımlamaktadır. Bu kısıtlama ile gerilim değerinin izin verilen sınırlar içerisinde artırılıp/ azaltılmasına izin verilir.

$$VR_{\min}^{A,B,C} \leq VR_i^{A,B,C} \leq VR_{\max}^{A,B,C} \quad (5)$$

2.2. Amaç Fonksiyonu

Çalışmanın amaç fonksiyonu, dağıtım hattındaki toplam aktif güç kayıplarını minimize etmeye yöneliktir. Eşitlik 6’da $P_{\text{loss}}^{\text{line}}$ hat boyunca meydana gelen toplam aktif güç kayıplarını ifade etmektedir ve bu kayıplar, her fazdaki akım karesinin (I_{ij}^2) hat direnci (R_{ij}) ile çarpılması ve tüm hatlar üzerinden toplanması ile hesaplanmaktadır. Bu amaç, 13-baralı bir dengesiz güç dağıtım hattında dağıtık ünitelerin optimal yerleşim ve büyüklüklerinin belirlenmesiyle gerçekleştirilmiştir.

$$P_{\text{loss}}^{\text{line}} = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^3 R_{ij} (I_{ij}^2) \quad (6)$$

3. YÖNTEM VE SİSTEM MODELİ

Bu bölümde, dengesiz üç fazlı güç dağıtım sistemlerinde yenilenebilir enerji kaynaklarının optimum konumlandırılması ve boyutlandırılması için kullanılan metodoloji ve sistem modeli detaylandırılmıştır. Öncelikle, optimizasyon sürecinde kullanılan Ağırlıklı Ortalama Optimizasyon Algoritmasının çalışma prensibi ve matematiksel formülasyonu açıklanmıştır. Ardından, çalışmada test platformu olarak kullanılan IEEE-13 baralı dengesiz dağıtım sisteminin teknik özellikleri ve karakteristikleri sunulmuştur. Son olarak, geliştirilen yük akış algoritmasının doğruluğunu ve performansını değerlendirmek amacıyla yapılan karşılaştırmalı analizler ve doğrulama sonuçları ortaya konulmuştur. Bu bölümdeki bilgiler, çalışmanın tekrarlanabilirliğini sağlamak ve uygulanan yöntemlerin etkinliğini göstermek açısından önem taşımaktadır.

3.1. Ağırlıklı Ortalama Optimizasyon Algoritması (AOOA)

AOOA, popülasyondaki her bireyin konumunu iteratif bir süreçle iyileştirerek global optimuma ulaşmayı hedefleyen yeni nesil bir arama algoritmasıdır [14]. Algoritmanın temelini oluşturan yenilikçi yaklaşım, keşif (exploration) ve derinlemesine arama (exploitation) süreçleri arasında etkili bir denge kurulmasını sağlamaktır. Bu süreçte ağırlıklı ortalama pozisyon, popülasyonun genel dağılımını temsil eden bir ölçüt olarak kullanılır ve algoritmanın daha hızlı ve daha doğru sonuçlara ulaşmasını mümkün kılar. AOOA’nın temel aldığı ağırlıklı ortalama pozisyon yaklaşımı, optimizasyon sürecinde bireylerin fitness değerlerini dikkate alarak, nüfusun genel özelliklerini yansıtan bir pozisyon belirler. Bu yöntem, her iterasyonda hesaplanan ağırlıklı ortalama pozisyonun, bireylerin kişisel en iyi pozisyonları (personal best) ve popülasyondaki global en iyi pozisyon (global best) ile birleştirilmesiyle uygulanır. Böylece, algoritma hem çözüm uzayını daha etkin bir şekilde keşfeder hem de en iyi çözüme doğru hızlı bir şekilde yakınsar. Ağırlıklı ortalama pozisyon, bireylerin fitness değerlerine bağlı olarak hesaplanır. Bu hesaplama, "Smaller-The-Better" (STB) ve "Larger-The-Better" (LTB) kriterlerine göre farklı şekilde gerçekleştirilir. STB durumunda ağırlıklı ortalama pozisyon Eşitlik 7’deki formülle hesaplanır.

$$X_{\mu} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{aday}}} X_i (\text{Fit}_{\text{tot}} - \text{Fit}(X_i))}{\text{Fit}_{\text{tot}} (N_{\text{aday}} - 1)} \quad (7)$$

X_{μ} , ağırlıklı ortalama pozisyonu; X_i , aday çözüm; $\text{Fit}(X_i)$, bireyin fitness değeri ve Fit_{tot} ; seçilen adayların fitness toplamını temsil eder. AOOA her iterasyonda, keşif (exploration) veya derinlemesine arama (exploitation) stratejilerinden birini uygular. Bu seçim, Eşitlik 8'deki parametre fonksiyonuna dayalıdır:

$$f(i_{\text{ter}}) = (\alpha \cdot \text{rast} - 1) \cdot \sin\left(i_{\text{ter}} \cdot \frac{\pi}{\max i_{\text{ter}}}\right) \quad (8)$$

Burada i_{ter} , mevcut iterasyon numarasını; $\max i_{\text{ter}}$, maksimum iterasyon sayısını; α , dengenin kontrolü için kullanılan bir sabiti ve rast, rastgele bir değeri ifade eder. Eğer $f(i_{\text{ter}}) \geq 0.5$ ise, sömürü; aksi durumda ise keşif stratejisi uygulanır.

Optimum konumlandırma ve boyutlandırma probleminin çözümünde, AOO algoritmasının maksimum iterasyon sayısı 100, popülasyon büyüklüğü ise 25 olarak seçilmiştir. Optimizasyon sonuçlarının güvenilirliğini ve tutarlılığını sağlamak amacıyla, her bir durum/senaryo için algoritma 100 kez bağımsız olarak çalıştırılmış ve elde edilen sonuçların ortalaması alınmıştır. Keşif ve sömürü süreçleri arasındaki dengeyi sağlamak üzere, α parametresi 10 olarak belirlenmiştir [14]. Söz konusu parametreler, literatürdeki benzer çalışmaların bulguları ve gerçekleştirilen ön analizler doğrultusunda, problem için en uygun performansı sağlayacak şekilde optimize edilmiştir.

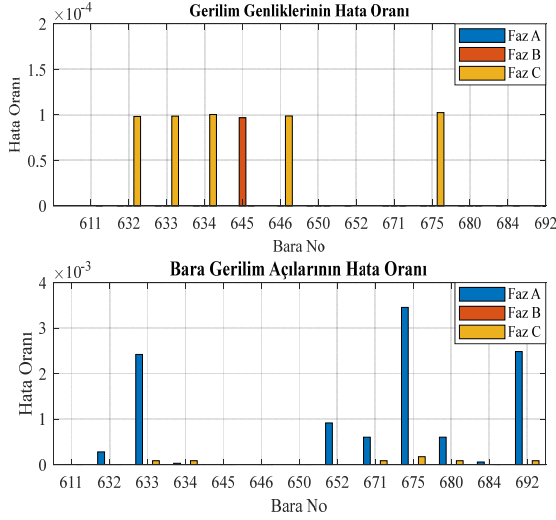
3.2. IEEE-13 Baralı Test Sisteminin Teknik Detayları

IEEE 13-baralı test sistemi, elektrik dağıtım şebekelerinin analizinde yaygın kullanıma sahip kompakt bir referans modelini teşkil etmektedir. Sistem, 4.16 kV nominal gerilim seviyesinde işletilmekte olup, kısa mesafeli iletim hatları ve yüksek yük yoğunluğu ile karakterize edilmektedir. Bu özellikler, sistemin bilhassa küçük ölçekli dağıtım şebekelerinin incelenmesinde optimal bir araştırma platformu olarak kullanılmasını mümkün kılmaktadır. Sistemin temel yapısal bileşenleri arasında, dengeli ve dengesiz karakteristiklere sahip noktasal yükler ile hat boyunca dağıtılmış yükler bulunmaktadır [15]. Dengesiz güç dağıtım sisteminde, yükler tek fazlı, iki fazlı, yıldız (Y) ya da delta (Δ) konfigürasyonlarında bağlanmıştır. Sistemde, sabit güç (PQ), sabit empedans (Z) ve sabit akım (I) olmak üzere üç farklı yük karakteristiği mevcuttur. Bu çeşitlilik, sistem performansının farklı yük senaryoları altında kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesine imkân tanımaktadır. IEEE-13 baralı test sisteminde reaktif güç kompanzasyonu, üç fazlı dengeli ve tek fazlı şönt kapasitör bankları vasıtasıyla sağlanmaktadır. Bu konfigürasyon, gerilim profilinin optimizasyonuna ve sistem kayıplarının minimizasyonuna katkıda bulunmaktadır. Ayrıca, üç fazlı yıldız bağlı bir gerilim regülatörü, her bir fazın gerilim seviyesini sürekli olarak monitörize ederek belirlenen limitler dahilinde kalmasını temin etmekte ve böylece sistem güvenilirliğini artırmaktadır. Hat konfigürasyonları açısından sistem hem üç fazlı hem de tek fazlı iletim hatlarını ihtiva etmektedir. Bu heterojen yapı, faz-faz ve faz-toprak bağlantılarının çeşitli kombinasyonlarının analiz edilmesine olanak tanımaktadır. Hatların farklı karakteristikleri, gerilim düşümü ve akım dengesizliklerinin detaylı incelenmesi bakımından sistemin analitik esnekliğini artırmaktadır. Sonuç olarak, IEEE 13-baralı test sistemi, dağıtım şebekelerinin temel parametrelerinin analizi için çok yönlü bir araştırma platformu sunmaktadır. Sistemin kompakt yapısı ve yüksek yük yoğunluğu, özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu ve optimizasyonu çalışmalarında değerli bir referans model olarak kullanılmasını mümkün kılmaktadır.

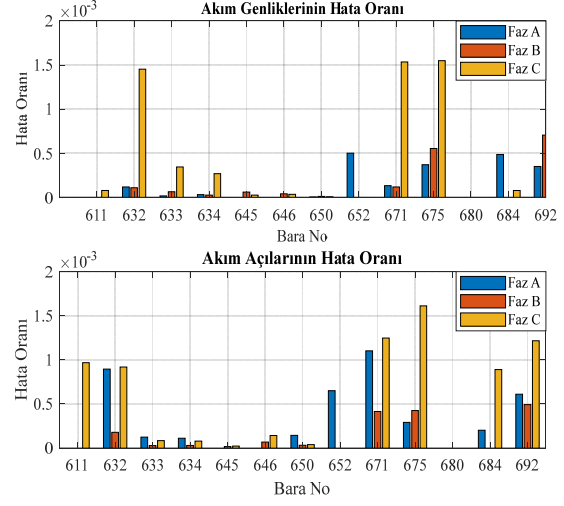
3.3. IEEE-13 Baralı Test Sisteminin Yük Akış Algoritmasının Sonuçlarının Karşılaştırılması

IEEE 13-baralı test sistemi kullanılarak gerçekleştirilen yük akış analizine ait gerilim, gerilim açısı, akım ve akım açılarındaki hata oranları Şekil 1 ve Şekil 2'de gösterilmiştir. Sonuçlar, her bara için Faz A, Faz B ve Faz C için ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Şekil 1'de yazılan Matlab script kod ile IEEE-13 baralı test sisteminin gerilimin genlik değerinin ve gerilimlerin açısına ait sonuçları karşılaştırılmıştır. Görüleceği üzere en kötü durumda genlik değerinin hata miktarı 1×10^{-4} seviyesindedir. Aynı şekilde 675.baraya ait gerilim açısının hata oranı ise A-fazında 3.5×10^{-3} seviyesinde hesaplanmıştır. Elde edilen hata sonuçları birçok ticari yazılımın üretmiş olduğu sonuçlardan daha küçüktür. Şekil 2'de akım genlikleri ve akım

açılarındaki hata oranları analiz edilmiştir. Baralara ait akım genliklerinin ve açılarının hata oranları C-fazında sırasıyla en yüksek 2×10^{-3} ve 1.5×10^{-3} mertebesinde hesaplanmıştır. İleri-geri süpürme metodu (BFLF) ile yazılan yük akış algoritmasının karşılaştırmalı analiz sonuçları, yazılan Matlab script kodun dengesiz dağıtım sistemleri üzerindeki doğruluk performansını değerlendirmekte etkili olduğunu göstermektedir. Sonuçlar, sistem fazlarının ayrı ayrı ele alınmasının ve optimizasyon algoritmalarının bu dengesizliklere göre uyarlanması önemini vurgulamaktadır.



Şekil 1 BFLF yük akışında elde edilen bara gerilim ve açısına ait değerlerin IEEE-13 baralı test sistemi ile karşılaştırılması



Şekil 2 BFLF yük akışında elde edilen bara akım ve açısına ait değerlerin IEEE-13 baralı test sistemi ile karşılaştırılması

4. BENZETİM SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Bu çalışma, IEEE 13-baralı dengesiz güç dağıtım sisteminde uygulanan üç farklı türdeki DÜ entegrasyon stratejisinin kapsamlı bir analizini sunmaktadır. Araştırma, Tip-I (PV), Tip-II (kapasitör) ve Tip-III (rüzgâr türbini) DÜ ünitelerini kapsamaktadır. Çizelge 1, 2 ve 3'te sunulan sonuçlar DÜ ilavesi sonrasında, güç dağıtım sisteminde oluşan aktif/reaktif güç kayıplarını ve gerilim profillerindeki değişimleri göstermektedir. Tablo 1, IEEE 13-baralı test sistemine fotovoltaik (PV) sistemlerin entegre edilmesi sonrasında, durum 1,2 ve 3 altında elde edilen güç enjeksiyonlarının sonuçlarını göstermektedir. Bu analiz, PV sistemlerin farklı baralarda konumlandırılması ve boyutlandırılması ile dağıtım sistemindeki güç kayıplarına, gerilim profiline ve faz dengesine olan etkisini göstermektedir. İlk durumda, 671 numaralı baraya bir adet PV sistemi Δ -bağlı şekilde yerleştirilmiştir. Bu bağlantı, her faza eşit büyüklükte aktif güç enjekte edilmesini sağlamak ve faz dengesini korumaktadır. Yalnızca aktif güç sağlandığı için güç faktörü 1 olarak belirlenmiştir. 671 nolu baradan 3068.47 kW aktif güç, dağıtım hattına enjekte edilmiş ve hatlarda $34.76 \text{ kW} + j75.40 \text{ kVAr}$ güç kaybı oluşmuştur. Yapılan konumlandırma ve boyutlandırma optimizasyonu ile sistemin maksimum gerilim değeri 675. barada 1.0677 pu seviyesine ulaşmıştır. İkinci durumda, PV'ler 634 ve 671 numaralı baralarda konumlandırılmıştır. 634 ve 671. baralardan sırasıyla 443.30 kW ve 2847.72 kW aktif güç sisteme gönderilmiştir. Bu durumda hat kayıpları $29.51 \text{ kW} + j64.26 \text{ kVAr}$ olarak hesaplanmıştır. Bu konumlandırmada da maksimum gerilim değeri 675. numaralı barada 1.0677 pu olarak ölçülmüş, gerilim profili ve faz dengesi iyileştirilmiştir. Durum-3'te ise 634, 671 ve 675 baralarına üç adet PV ünitesi yerleştirilmiştir. Bu durumda, 634 barasında 443.28 kW, 671 barasında 1962.56 kW ve 675 barasında 880.66 kW aktif güç sisteme basılmıştır. Elde edilen maksimum gerilim değeri 1.0699 pu olarak kaydedilmiş olup, bu senaryo gerilim stabilitesi açısından en yüksek iyileşmeyi sağlamıştır. Bu sonuçlar ile, PV'lerin optimum konumlandırılması ve boyutlandırılması ile dağıtım sistemlerindeki aktif güç kayıplarını azaltılabileceğini, gerilim profilini iyileştirebileceğini ve sistemde faz dengesini koruyabileceğini göstermektedir.

Çizelge 1. Tip-I DÜ'ler (Senaryo I) tarafından enjekte edilen dengeli güç sonuçları

Senaryo I	Durum no	Konum (Bara no)	Güç faktörü $\cos(\Phi)$	DÜ boyutu (kW)	Bağlantı tipi	P_{Loss}^{Active} (kW) $Q_{Loss}^{Reactive}$ (kVAr)	$V_{Maksimum}$ (p.u) Bara numarası
İlk durum	-----	-----	-----	-----	-----	110.103 j324.653	1.0553 \angle - 122.52 Bara 675 (B)
1-PV	Case 1	671 (A) 671 (B) 671 (C)	1	3068.4681	Δ	34.75911 j75.40031	1.0677 \angle - 118.19 Bara 675 (B)
2-PV	Case 2	634 (A) 634 (B) 634 (C) 671 (A) 671 (B) 671 (C)	1	443.3025	Δ	29.51075 j64.25942	1.0677 \angle - 118.19 Bara 675 (B)
3-PV	Case 3	634 (A) 634 (B) 634 (C) 671 (A) 671 (B) 671 (C) 675 (A) 675 (B) 675 (C)	1	1962.56475	Δ	27.54431 j62.27445	1.0699 \angle - 118.11 Bara 675 (B)
			1	880.66361	Δ		

Çizelge 2, IEEE 13-baralı dağıtım sistemine kapasitör tankı (KT) eklenmesi sonrasında elde edilen sonuçları göstermektedir. Çalışmada, sistemin farklı baralarına eklenen kapasitörlerin, dağıtım hatlarındaki aktif ve reaktif güç kayıplarını azalttığı ve gerilim profilinin iyileştirilmesinde yardımcı olduğunu göstermektedir. İlk durumda, 671 numaralı baraya kapasitör tankı yerleştirilmiştir. Bu konfigürasyonda, 671 barasında 1261.27 kVAr reaktif güç enjekte edilmiştir. Hat kayıpları başlangıç durumunda 110.1 kW+j324.653 kVAr ölçülmüştür. Kapasitör tank ilavesi sonucunda hat kayıpları 96.70 kW + j284.85 kVAr seviyesine düşmüştür. Sisteme kapasitör ilavesi sonrası maksimum gerilim değeri 1.0675 pu seviyesine ulaşmıştır. Bu senaryo, tek konumda gerçekleştirilen kapasitör ilavesinin gerilim profilinde belirgin bir iyileşme sağladığını göstermektedir. İkinci durumda, 634 ve 671 numaralı baralara kapasitörler eklenmiştir. Baralarda sırasıyla 339.61 ve 1086.81 kVAr reaktif güç dağıtım sistemine basılmıştır. Bu durumda hat kayıpları aktif ve reaktif güçler için 93.61 kW + j277.76 kVAr seviyesine kadar inmiştir. Bu yerleşim ile sistemdeki maksimum gerilim değeri 1.0886 pu olarak kaydedilmiştir. İki farklı baraya kapasitör eklenmesi ile daha geniş bir voltaj desteği sağlanmış ve kayıplar optimize edilmiştir. Durum-3'te, 632, 634 ve 671 numaralı baralara kapasitörler yerleştirilmiştir. Bu durumda, 632 barasına 567.65 kVAr, 634 barasına 297.96 kVAr ve 671 barasına 827.77 kVAr reaktif güç sisteme enjekte edilmiştir. Hat kayıpları 93.04 kW + j275.64 kVAr olarak hesaplanmıştır. Maksimum gerilim değeri 1.0888 pu olarak 675.barada kaydedilmiştir. Üç baraya yapılan kapasitör ilavesi, gerilim dengesini sağlamak ve kayıpları minimize etmede en yüksek verimi sağlamıştır. Elde edilen sonuçlar, kapasitörlerin uygun konumlandırılması ile dağıtım sistemlerinde reaktif güç desteği sağlayarak gerilim profilini iyileştirdiğini ve güç kayıplarını azalttığını göstermektedir. Kapasitör ilavesi, dağıtım sisteminin daha verimli ve güvenilir bir şekilde çalışmasını desteklemektedir.

Çizelge 2. Tip-II DÜ'ler (Senaryo II) tarafından enjekte edilen dengeli güç sonuçları

Senaryo II	Durum no	Konum (Bara no)	DÜ boyutu (kVAr)	Bağlantı tipi	P_{Loss}^{Active} (kW) $Q_{Loss}^{Reactive}$ (kVAr)	$V_{Maksimum}$ (p.u) Bara numarası
İlk durum	-----	-----	-----	-----	110.103 j324.653	1.0553 \angle - 122.52 Bara 675 (B)
1-KT	Case 1	671 (A) 671 (B) 671 (C)	1261.27405	Δ	96.69876 j284.85384	1.0675 \angle - 118.19 Bara 675 (B)
2-KT	Case 2	634 (A) 634 (B) 634 (C) 671 (A) 671 (B) 671 (C)	339.60720 1086.80732	Δ Δ	93.61243 j277.76005	1.0886 \angle - 122.79 Bara 675 (B)
3-KT	Case 3	632 (A) 632 (B) 632 (C) 634 (A) 634 (B) 634 (C) 671 (A) 671 (B) 671 (C)	567.6460236 297.95810 827.77002	Δ Δ Δ	93.04421 j275.63566	1.0888 \angle - 122.78 Bara 675 (B)

Çizelge 3, 13-baralı test sistemine rüzgâr türbini eklenmesi ile elde edilen güç aktarımlarının çeşitli senaryolar altındaki etkilerini göstermektedir. Bu çalışma, sistemde farklı baralara eklenen rüzgâr türbinlerinin aktif ve reaktif güç enjeksiyonu ile güç kayıplarını ve gerilim profillerini nasıl etkilediğini analiz etmektedir. Durum-1'de, 671 numaralı baraya bir adet rüzgâr türbini bağlanmıştır. Güç faktörü (GF) 0.942 olarak belirlenmiş olup, türbin 3275.01 kVA güç üretmektedir. Bu durumda güç dağıtım hattında 25.11 kW aktif güç ve j.49.57 kVAr reaktif güç kaybı meydana gelmektedir. Maksimum gerilim değeri birinci ve ikinci senaryoya benzer şekilde 675.barada olduğu görülmektedir. Rüzgâr türbinin güç dağıtım sistemine ilavesi sonrasında, sistemin gerilim seviyesini sınırlar içerisinde kalacak şekilde yükseltmiştir. İkinci durumda, rüzgâr türbinleri 634 ve 671 numaralı baralara yerleştirilmiştir. 634 barasına bağlanan türbinin güç faktörü 0.8126 olup 543.43 kVA güç üretmektedir. 671 barasına bağlanan türbin ise anlık olarak 3001.57 kVA güç üretmekte olup, güç faktörü 0.952 olarak hesaplanmıştır. Konumlandırma ve boyutlandırma sonrasında dağıtım hatlarındaki aktif ve reaktif kayıp güç değeri sırasıyla 17.60 kW ve j33.53 kVAr olarak hesaplanmıştır. Bu yerleşim ile maksimum gerilim değeri 1.0956 pu olarak kaydedilmiştir. İki bara üzerinde rüzgâr türbinlerinin bulunması, dağıtık güç enjeksiyonuyla sistemde daha geniş bir gerilim desteği sağlamaktadır. Üçüncü durumda, 634, 671 ve 675 numaralı baralara üç adet rüzgâr türbini yerleştirilmiştir. 634 barasında güç faktörü 0.81266 olan türbin 543.42 kVA anlık güç üretmekte, 671.barada yer alan WT ise 2183.56 kVA ve GF değeri ise 0.90827 olarak şekilde anlık güç üretimi yapmaktadır. 675 barasına yerleştirilen üçüncü türbin ise tam güç faktörü (GF = 1.0) ile çalışarak 868.31 kVA güç sağlamaktadır. Yerleşim tahsisi sonucunda dağıtım hatlarında meydana gelen aktif/reaktif güç kaybı 15.82 kW ve j.31.85 kVAr olarak hesaplanmıştır. Maksimum gerilim değeri 1.0975 pu'dur. Optimum rüzgâr türbini yerleşimi, sistemde düşük güç kaybı, iyileştirilmiş gerilim ve güç kalitesi sağlayarak dağıtım sisteminin performansını artırmaktadır.

Çizelge 3 Tip-III DÜ'ler (Senaryo III) tarafından enjekte edilen dengeli güç sonuçları

Senaryo III	Durum no	Konum (Bara no)	Güç faktörü $\cos(\Phi)$	DÜ boyutu (kVA)	Bağlantı tipi	P_{Loss}^{Active} (kW) $Q_{Loss}^{Reactive}$ (kVAr)	$V^{Maksimum}$ (p.u) Bara numarası
İlk durum	-----	-----	-----	-----	-----	110.103 j324.653	1.0553 \angle - 122.52 Bara 675 (B)
1-RT	Case 1	671 (A) 671 (B) 671 (C)	0.94176	3275.01127	Δ	25.11005 j49.56718	1.0959 \angle -118.53 Bara 675 (B)
2-RT	Case 2	634 (A) 634 (B) 634 (C) 671 (A) 671 (B) 671 (C)	0.81266 0.95146	543.42944 3001.57305	Δ Δ	17.60208 j33.53017	1.0956 \angle -118.53 Bara 675 (B)
3-RT	Case 3	634 (A) 634 (B) 634 (C) 671 (A) 671 (B) 671 (C) 675 (A) 675 (B) 675 (C)	0.90827 1.0000	2183.56326 868.31394	Δ Δ	15.81642 j31.84643	1.0975 \angle -118.44 Bara 675 (B)

5. SONUÇ

Bu çalışmada, Tip-I, Tip-II ve Tip-III DÜ ünitelerinin, dengesiz üç fazlı güç dağıtım hattına entegre edilmesi sonucunda, hattın aktif /reaktif güç kayıplarının ve bara gerilim profilleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. PV sistemlerinin farklı baralarda konumlandırılması ve boyutlandırılması, gerilim profili üzerinde belirgin bir iyileşme sağlamış, ayrıca aktif güç kayıplarını azaltmış ve sistemin faz dengesini optimize etmiştir. Yapılan analizlerde, PV ünitelerinin uygun baralara konumlandırılması ile gerilim seviyesinin iyileştirildiği ve çoklu PV ünite konfigürasyonlarıyla daha dengeli bir güç dağılımı sağlandığı görülmüştür. Özellikle 634, 671 ve 675 baralarına üç adet PV yerleştirildiği durumda, sistemin gerilim seviyesi 1.0699 pu olarak kaydedilmiştir. Senaryo-II'de kapasitör ünitelerinin dağıtım sistemine eklenmesi sonucunda, reaktif güç desteği sağlanmış ve gerilim profili iyileştirilerek hat kayıpları belirli seviyelere kadar düşürülmüştür. Kapasitörlerin uygun baralara tahsisi ile gerilim seviyesi ve sistem verimliliğinin artmasına katkı sağlamış; özellikle üç farklı baraya yapılan kapasitör ilaveleri, sistemde maksimum gerilim değerini 1.0888 pu seviyesine ulaştırmış ve aktif güç kayıp değeri 93.04 kW olarak hesaplanmıştır. Rüzgâr türbinlerinin entegrasyonu ile elde edilen analizlerde, türbinlerin farklı baralarda konumlandırılması, sistemdeki aktif ve reaktif güç kayıplarını %85,75 seviyede azaltmış ve gerilim profillerini iyileştirerek sistemin kararlılığını artırmıştır. Üç farklı baraya yerleştirilen rüzgâr türbinleri ile gerilim değeri 1.0975 pu olarak kaydedilmiştir. Rüzgâr türbinlerinin uygun boyutlandırılması ve konumlandırılması, dağıtım sistemlerinde hem gerilim stabilitesi hem de güç kalitesinin iyileştirilmesine olanak tanımıştır.

Genel olarak, bu çalışmanın bulguları, farklı türdeki DÜ ünitelerinin etkin bir şekilde konumlandırılması ve boyutlandırılması ile dağıtım sistemlerinde aktif ve reaktif güç kayıplarının azaltılabileceğini, gerilim profilinin iyileştirilebileceğini ve sistemde faz dengesinin sağlanabileceğini göstermiştir. Bu tür DÜ entegrasyon stratejileri, dağıtım sistemlerinin daha verimli, güvenilir ve sürdürülebilir olmasına katkı sağlamaktadır.

Gelecek çalışmalarda, DÜ'lerin dinamik yük koşulları altındaki performansları değerlendirilebilir ve farklı yük profilleriyle sistem kararlılığı analiz edilebilir. Ayrıca, farklı kontrol stratejilerinin kullanılmasıyla, PV sistemleri, rüzgâr türbinleri ve kapasitörlerin daha akıllı ve otonom yönetimi sağlanabilir. Bu bağlamda,

yapay zekâ tabanlı optimizasyon algoritmalarının kullanılmasıyla, DÜ ünitelerinin en uygun konumlandırılması ve boyutlandırılması sağlanarak, güç kayıplarının minimuma indirilmesi ve sistemin daha verimli hale getirilmesi amaçlanabilir. Bunun yanı sıra, gelecekteki araştırmalar, elektrikli araçlar (EV) ve enerji depolama sistemleri (ESS) gibi yeni nesil teknolojilerin DÜ sistemleriyle entegrasyonuna odaklanabilir. Bu tür yenilikçi sistemler, enerji yönetimi stratejilerinin geliştirilmesine katkı sağlayarak, dağıtım sistemlerinin esnekliğini ve güvenilirliğini artırabilir.

6. KAYNAKLAR

1. Çıkan, M. ve Nacar Çıkan, N. (2024). Elektrikli araç şarj istasyonlarının enerji dağıtım hatlarına optimum şekilde konumlandırılması. *Kahramanmaraş Sütcü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(2), 340-363.
2. Nacar Cikan, N. & Cikan, M. (2024). Reconfiguration of 123-bus unbalanced power distribution network analysis by considering minimization of current & voltage unbalanced indexes and power loss. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 157, 109796.
3. Rezaee Jordehi, A. (2016). Allocation of distributed generation units in electric power systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 893-905.
4. Bawazir, R.O. & Cetin, N.S. (2020). Comprehensive overview of optimizing PV-DG allocation in power system and solar energy resource potential assessments. *Energy Reports*, 6, 173-208.
5. Cikan, M. & Nacar Cikan, N. (2023). Optimum allocation of multiple type and number of DG units based on IEEE 123-bus unbalanced multi-phase power distribution system. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 144, 108564.
6. Cikan, M. & Kekezoglu, B. (2022). Comparison of metaheuristic optimization techniques including Equilibrium optimizer algorithm in power distribution network reconfiguration. *Alexandria Engineering Journal*, 61(2), 991-1031.
7. Cikan, M. & Dogansahin K. (2023). A comprehensive evaluation of up-to-date optimization algorithms on MPPT application for photovoltaic systems. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 45(4), 10381-10407.
8. Cikan, M. (2025). Maximum power point tracker design for photovoltaic systems under partial shading conditions by using cheetah optimizer algorithm. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 40(1), 555-572.
9. Cikan, M., Nacar Cikan, N. & Kekezoglu, B. (2025). Determination of optimal island regions with simultaneous DG allocation and reconfiguration in power distribution networks. *IET Renewable Power Generation*, 19, e12942.
10. Balu, K. & Mukherjee, V. (2023). Optimal allocation of electric vehicle charging stations and renewable distributed generation with battery energy storage in radial distribution system considering time sequence characteristics of generation and load demand. *Journal of Energy Storage*, 59, 106533.
11. Gümüş, T.E., Emiroglu, S. & Yalcin, M.A. (2023). Optimal DG allocation and sizing in distribution systems with Thevenin based impedance stability index. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 144, 108555.
12. Kandasamy, M., Thangavel, R., Arumugan, T., Kumarayel, S., Aruchamy, S., Kim, W.W. & Geem, Z.W. (2023). Strategic incorporation of DSTATCOM and distributed generations in balanced and unbalanced radial power distribution networks considering time varying loads. *Energy Reports*, 9, 4345-4359.
13. Pushkarna, M., Ashfaq, H., Singh, R. & Rajeev, K. (2024). An optimal placement and sizing of type-IV DG with reactive power support using UPQC in an unbalanced distribution system using particle swarm optimization. *Energy Systems*, 15, 353-370.
14. Cheng, J. & Waele De W. (2024). Weighted average algorithm: A novel meta-heuristic optimization algorithm based on the weighted average position concept. *Knowledge-Based Systems*, 305, 112564
15. IEEE Distribution Planning Working Group Report (1991). Radial Distribution Test Feeders. *Transactions on Power Systems*, 6(3), 975-985.