



ALTERNATİF AKIM MİKRO-ŞEBEKELERDE ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİNİN KONUM OPTİMİZASYONU

Tuncay ALTUN^{1*}

¹Yozgat Bozok University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Electrical and Electronics Engineering, 66900, Yozgat, Türkiye

Özet: Bu çalışma, üretim yöntemleri ve tüketim davranışlarına göre elektrik üretim maliyetlerini en aza indirmek ve geleneksel üretim profilini düzeltmek için alternatif akım (AA) mikro-şebekedeki enerji depolama sistemlerinin optimum konumlandırılması problemi ele almaktadır. Dağıtım şebekelerinin fiziksel ve operasyonel kısıtlarının yanında üretim santrallerindeki kısıtlarda probleme dahil edilmiştir. Geleneksel üretim santralleri gibi düzenli üretim aralıklarına sahip santrallerin yanı sıra rüzgâr türbinleri gibi düzensiz üretim aralıklarına sahip yenilenebilir enerji kaynakları da AA mikro-şebeke yapısına dahil edilerek enerji depolama sistemlerinin optimal konumlandırılması problemi genişletilmiştir. Problemin doğrusal ve konveks olmayan kısıtları göz önüne alındığında çözümünü mümkün kılmak için güç akış denklemlerinin bir üst boyut uzayında ifade edilmesi gerekmektedir. Konveks ve doğrusal olmayan güç akış denklemleri ve ikili karar değişkenini içeren enerji depolama sistemlerinin konumlandırılması için karmaşık tam sayılı doğrusal olmayan programlama çerçevesi geliştirilmiştir. Enerji depolama sistemlerinin konumlandırılmasının optimum olarak bulunması, geleneksel üreteçlerin üretim profillerinin düzeltilmesini sağlar ve şebekede enerji sürekliliğinin sağlanmasında kritik rol oynar. Önerilen optimum enerji depolama sisteminin yerleşimi algoritması, IEEE 9-baralı test sistemine uygulanarak performansı doğrulanmıştır.

Anahtar kelimeler: AA mikro-şebekeler, Enerji depolama sistemleri, Karmaşık tam sayılı doğrusal olmayan programlama, Karmaşık tam sayılı ikinci dereceden konik programlama, Konveks optimizasyon


Optimal Location of Energy Storage Systems on Alternative Current Micro-grids

Abstract: This study addresses the problem of optimal positioning of energy storage systems in the AA micro-grids to minimize electrical generation costs and smooth the conventional generation profile based on generation methods and consumption behaviors. In addition to the physical and operational restrictions of distribution networks, restrictions in generation plants are also included in the problem formulation. The problem has been expanded by including power plants with regular generation intervals, such as traditional power plants, as well as renewable energy sources with irregular generation intervals, such as wind turbines, in alternative current (AC) micro-grids. In order to make the problem considering the non-convex and non-linear constraints solvable, reformulation of the power flow equations is needed to reformulate in higher dimensional space. A mixed-integer non-linear programming framework for handling the non-convex power flow equations, and binary decision variables accounting for the energy storage system placement has been developed. Obtaining optimal location of energy storage systems plays a critical role in smoothing the conventional generation profile and maintains energy reliability. The performance of the proposed optimal energy storage placement algorithm has been verified on IEEE 9-bus benchmark.

Keywords: AC Micro-grids, Energy storage systems, Mixed-integer non-linear programming, Mixed-integer second order-cone programming, Convex optimization

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Yozgat Bozok University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Electrical and Electronics Engineering, 66900, Yozgat, Türkiye

E mail: tuncay.altun@yobu.edu.tr (T. ALTUN)

Tuncay ALTUN  <https://orcid.org/0000-0003-1499-3384>

Gönderi: 24 Mayıs 2024

Kabul: 23 Haziran 2024

Yayınlanma: 15 Temmuz 2024

Received: May 24, 2024

Accepted: June 23, 2024

Published: July 15, 2024

Cite as: Altun T. 2024. Optimal location of energy storage systems on alternative current micro-grids. BSJ Eng Sci, 7(4): 662-671.

1. Giriş

Güç sistemlerindeki problemler üç başlık altında sınıflandırılmıştır. Güç akışı, ekonomik dağıtım ve optimal güç akışıdır. Güç akışı veya diğer bir ifadeyle yük akışı kontrolünde problem tanımı; üretim, yük ve iletim ağı denklemlerinden oluşmaktadır. Güç akışı yöntemlerinin analizi matematiksel olarak ifade edilebilir. Ancak fiziksel ve optimal olarak mümkün olmayan çözümler önerir. Güç sistemlerinde önemli olan diğer bir problem ekonomik güç dağıtımıdır. Güç dağıtım

hesaplamalarında en düşük maliyetin belirlenmesi için çeşitli parametreler ile problem formülize edilir. Ancak bu formüller, güç akışı kısıtlarını etkileyerek güç akışı kontrolünün basitleştirilmesine hatta bazı güç akışında önemli parametrelerin ihmal edilmesine neden olabilir. Bu durum güç sistemlerinin kararlı çalışmasını tehlikeye sokabilir. Optimal güç akışı (OGA) ile güç sistemlerinin kararlılığını bozmadan en düşük maliyetli dağıtım amaçlanmaktadır. Bu durum güvenlik kısıtlı ekonomik dağıtım olarak da adlandırılır. OGA'da güç akışı kısıtları,



jeneratör minimum çıkış kısıtları, iletim hattı kararlılığı, gerilim kısıtları, fiziksel kısıtlar ve operasyonel kısıtlar ile amaç fonksiyonuna en uygun çözüm bulunması hedeflenmektedir. OGA'daki tüm bu kısıtlar ile amaç fonksiyonunun çözümü için farklı analiz yöntemleri bulunmaktadır.

Güç sistemlerinde güç akışı problemleri ve çözüm önerileri 1930'ların başlarında şebekelerin ekonomik dağıtım yapmasının sağlanması amacıyla ele alınmıştır (Happ, 1977). O yıllarda ekonomik dağıtım hesaplama süresinin uzun olması uygulanabilirliğini azaltmıştır. OGA problemi ilk olarak 1960'larda formülüze edilmesine rağmen çözümündeki zorluklar tam olarak uygulanabilmesini zorlaştırmıştır (Carpentier, 1977). OGA probleminin çözümünde lineer çözümler problemin lineer kısımları için kullanılabilmesine rağmen lineer olmayan denklem ve terimler için önerilen çözümler yetersiz kalmıştır. Ayrıca lineer olmayan terimlerin tam olarak ifade edilememesi çözümün problem formülasyonunun doğruluğunu da azaltmıştır. Tüm bu nedenlerden dolayı problemlerin çözümünün elde edilmesi ağır işlem yükü getirirken, lineer olmayan yaklaşımlardan dolayı sadece küçük ölçekli uygulamalarda tercih edilmiştir. Bu durum elektrik dağıtım şebekelerinin arz-talep dengesinin planlanmasını ve kontrol edilmesini zorlaştırmıştır.

Elektrik dağıtım şebekelerinde tüketimin dengeli olmaması ve yük tahminlerinin yapılamaması beraberinde birçok problemi getirmektedir. Güç taleplerinin belli saat dilimlerinde yoğunlaşması enerji arzı, maliyet, yük akış kontrolü gibi problemlere neden olmaktadır. Gerek enerji maliyetlerini azaltmak gerekse de temiz enerji kullanımının artırılması için yenilenebilir enerji kaynaklarından yararlanılmaktadır. Ancak yenilenebilir enerji kaynaklarındaki enerji üretimi toplam talebe yetecek olsa bile, puant saatlerdeki kullanımı karşılayacak arz güvenliğini sunamamaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarındaki düzenli olmayan enerji üretim profili, enerji talep profilini karşılayamamaktadır. Özellikle puant saatlerde ortalamadan çok üstünde enerji ihtiyacı oluşmaktadır. Bu problemin aşılması için son yıllarda güç dağıtım sistemlerinde entegre enerji depolama sistemlerinin kullanımı artmaktadır. Enerji depolama sistemlerinin kullanımı ile tüketim maliyetleri azaltılmasının yanında arz güvenliği kontrol altına alınmaya çalışılmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından rüzgâr türbinlerinin düzensiz ve tahmin edilemeyen enerji üretim profili, güneş panellerinin ise sadece tüketimin az olduğu saat dilimlerindeki enerji üretimi enerjinin depolanması zorunluluğunu getirmiştir. Bu nedenle enerji depolama sistemleri, özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının olduğu güç dağıtım sistemlerinde önemli rol oynamaktadır. Tüm bu nedenlerden dolayı güç sistemlerinde depolama sistemlerinin yenilenebilir enerji kaynakları ile kullanılması arz güvenliğinin artırılması (Nojavan ve ark., 2017), sistemdeki voltaj regülasyonunun sağlanması (Nick ve ark., 2017), tepe

noktalarının azaltılması (Fossati ve ark., 2015), yenilenebilir enerji kaynaklarının daha etkin kullanılması (Stecca ve ark., 2020) ve tahmin hatalarının azaltılması (Reddy ve ark., 2018) gibi çeşitli avantajlar sunmaktadır. Bu amaçla güç sistemlerinde enerji depolama sistemlerinin kullanımıyla yenilenebilir enerji tabanlı sistemlerin faydalarının artırılmasına yönelik çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda, enerji depolama sistemlerinin konumlandırma problemi yerine boyutları ve kayıplar konusu ele alınmıştır (Morstyn ve ark., 2017; Hannan ve ark., 2020). Ancak gerçekte enerji depolama sistemlerinin yüksek yatırım maliyetlerinden kaynaklı optimum olmayan konumlandırılması beklenen faydaları sağlayamamıştır. Bu nedenle, enerji depolama sistemlerinin optimum konumlandırılmasıyla güç dağıtım sistemlerindeki avantajların artırılması amaçlanmıştır. Güç dağıtım sistemlerinde enerji depolama sistemlerinin kullanımı ile ilgili birçok araştırma yapılmıştır. Bu araştırmalarda; güç kayıplarının azaltılması için whale optimizasyon algoritması (WOA) (Calderaro ve ark., 2013), meta-sezgisel tabanlı genetik algoritma (GA) (Dutta ve Sharma, 2012) ve parçacık sürü algoritması (PSO) (Karimi ve ark., 2014) kullanılmıştır. Sistem kayıplarını en aza indirmek ve enerji depolama sistemlerinin boyutlarını optimize etmek için kullanılan bu çalışmalarda geleneksel üretim profilinin düzleştirilmesi amaçlanmıştır. Ancak bu çalışmalarda da toplam maliyetin azaltılmasına yönelik enerji depolama sistemlerinin şarj/deşarj performansı dikkate alınmamıştır. Dolayısıyla literatürde, enerji depolama sistemlerinin sisteminin konumu seçilirken yenilenebilir bir enerji kaynağı veya büyük bir yükün bağlandığı bara seçilmiştir. Çalışmalarda kayıpların azaltılması veya diğer kazanımlar için enerji depolama sistemlerinin boyutlandırılmasına odaklanılmıştır. Esas olarak toplam maliyeti azaltmak için enerji depolama sistemlerinin konumunun belirlenmesi göz ardı edilmiştir.

Güç dağıtım sistemlerinde toplam maliyetin azaltılması, yük profilinin düzleştirilmesi ve güç planlamalarının yapılabilmesi için enerji depolama sistemlerinin konumlandırılması problemi ortaya çıkmaktadır. Optimum enerji depolama sistemlerinin konumlandırma problemi karmaşık tam sayılı doğrusal olmayan programlama modeline ile ifade edilebilir. Ancak bu problemin çözümünde dışbükey olmayan güç akışı denklemleri ve baralara yerleştirilecek enerji depolama sistemlerinin miktarlarının belirlenmesindeki ikili değişkenler nedeniyle zordur (Kim ve Dvorkin, 2018; Wong ve ark., 2019). Problemin çözümü için yapılan çalışmalarda, doğrusal yaklaşımlar (Zidar ve ark., 2016; Dui ve ark., 2017; Yang ve ark., 2018), ve optimizasyon yöntemleri kullanılmıştır (Guo ve ark., 2021; Byrne ve ark., 2017; Li ve ark., 2022; Yang ve ark., 2023). Ancak bu çözümler sistemin fiziksel yapısını tam olarak temsil edememektedir. Bu nedenle güç akışı denklemlerindeki konveks olmayan ifadelerin çözümü için bazı yaklaşık yöntemler ve eşdeğer yaklaşımlar kullanılır (Huang ve ark., 2016; Huang ve ark., 2022). Bu çalışmada, enerji

depolama sistemlerinin rüzgâr türbin santrali ile kullanıldığı AA mikro-şebekelerde OGA probleminin çözümü ele alınmıştır. Problemin çözümü için ilk olarak konveks gevşetme yöntemleri uygulanmıştır. Böylelikle çözüm kolaylaştırılmıştır. Daha sonra ikinci dereceden konik programlama (SOCP-Second-Order-Cone-Programming) ve yarı kesin programlama (SDP-Semidefinite Programming) yöntemleri ile çözüm tamamlanmıştır (Kekatos ve ark., 2014; Tian ve ark., 2016; Zia ve ark., 2019).

Çalışma neticesinde güç dağıtım sisteminde geleneksel üretim profilinin düzleştirilmesiyle günlük enerji maliyetinin minimize edilmesi için enerji depolama sistemlerinin konumunun belirlenmesi amaçlanmıştır. Yapılan çalışmada, ikinci dereceden non-linear güç akışı denklemleri ve enerji depolama sistemlerinin hangi barada olacağı kararının verileceği ikili karar değişkenleri nedeniyle formülasyonda karmaşık tam sayılı doğrusal olmayan programlama (MINLP-mixed integer nonlinear programming) kullanılmıştır. İkinci aşamada problem, karışık tam sayılı ikinci dereceden koni programlamaya (MISOCP- mixed integer second-order cone programming) dönüştürülmüştür. Sonuç olarak elde edilen algoritma ile AA mikro-şebekelerdeki tüm fiziksel ve operasyonel kısıtlar ile sistemdeki jeneratörlerin üretim miktarları, yenilenebilir enerji kaynakları ile en düşük maliyet için uygun enerji depolama sistemlerinin konumunun belirlenmesine karar vermektedir.

Bu makalenin bir sonraki kısmında izlenecek metod açıklanmıştır. 3. başlıkta bulgular ve tartışmalara yer verilmiştir. 4. Kısımda sonuçlardan bahsedilerek makale tamamlanmıştır.

2. Materyal ve Yöntem

Bu çalışma, bir AA-mikro şebekedeki yenilenebilir enerji kaynaklı dengesiz enerji üretimini enerji depolama sistemleriyle düzelterek toplam maliyeti azaltmak için tasarlanmıştır. Toplam maliyetin azaltılmasının yanı sıra enerji güvenilirliğinin ve sürdürülebilirliğinin artırılması amacıyla rüzgâr türbinlerinin yenilenebilir enerji kaynaklarından kullanılması amaçlanmaktadır. Bu nedenle, AA mikro-şebekesindeki rüzgâr türbini güç

sistemleri ve enerji depolama sistemlerinin güç dağıtım sistemindeki konumu için kullanılan matematiksel denklemler aşağıdaki alt bölümlerde sunulmaktadır.

2.1. Rüzgâr Türbini Enerjisi

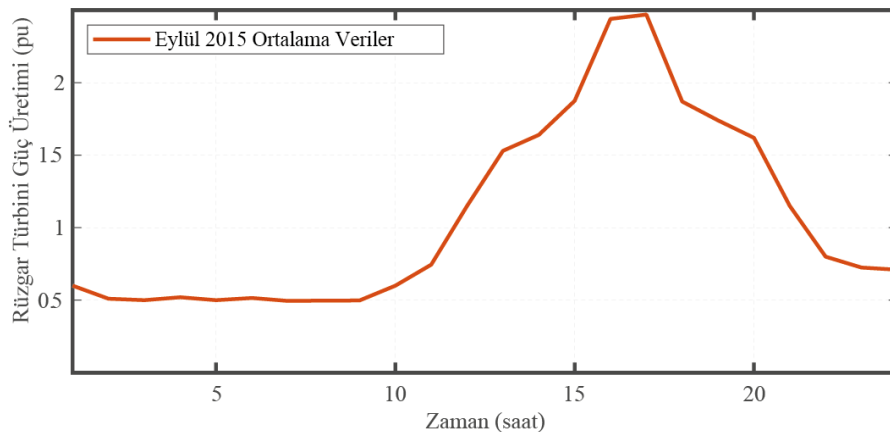
Rüzgâr, yeryüzünün eşit olmayan şekilde ısınması ve soğuması sonucu oluşan hava hareketleridir. Rüzgâr enerjisi ise rüzgârı oluşturan hava akımının hareket enerjisidir. Günümüzde enerji maliyetlerinin düşürülmesi ve fosil yakıtların azaltılması amacıyla elektrik üretiminde rüzgâr türbinleri kullanılmaktadır. Rüzgâr türbinleri rüzgardaki kinetik enerjiyi önce mekanik enerjiye, daha sonra da elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerdir. Ancak üretilen enerjinin hava akımlarına bağlı olması düzensiz enerji üretimine neden olmaktadır. Rüzgâr türbinlerinin kullanıldığı enerji dağıtım sistemlerinde bu önemli bir dezavantajdır. Bu nedenle enerji üretimi ve talep profili düzensiz olan güç dağıtım sistemlerinde enerji depolama sistemlerinin kullanılması önemlidir.

Çalışmada, Sivas ili Kangal ilçesindeki rüzgâr türbinlerinden Eylül 2015'te üretilen enerjinin aylık üretim verilerinin 24 saatlik ortalaması kullanılmıştır. Bu veriler, IEEE test veri setlerindeki geleneksel enerji kaynaklarından biriyle değiştirilmiştir. Çalışmada kullanılan rüzgâr türbininden üretilen enerji miktarı birim (pu) değerlerine göre Şekil 1'de gösterilmektedir.

2.2. Enerji Depolama Sistemlerinin Konumlandırılması

Enerji depolama sistemlerinin optimum konumu öncelikle bir MINLP problemi olarak formüle edilmiştir. Daha sonra problem, MINLP yerine dal-sınır ile uyumlu ikili değişkenlerin kullanımına olanak sağlayan MISOCP ile yeniden formülize edilmiştir. Böylelikle enerji depolama sistemlerinin şarj/deşarj anları güç elektroniği yarı iletken kontrol elemanları kullanılarak devreye alınabilecek veya devreden çıkarılabilecektir.

Güç dağıtım sistemlerinde enerji depolama sistemlerinin konumu OGA çözümlerinde olduğu gibi MINLP formülü (Kayacak ve Kocuk, 2020) ile belirtilebilir. OGA problemi, güç dağıtım sisteminde maliyetin düşürülmesi için enerji depolama sistemlerinin konumu problemine dönüştürülmüştür.



Şekil 1. Rüzgâr Türbini Güç Üretiminin bir günlük profili.

Bunun için üretim santralinde enerji maliyeti yüksek iken enerji depolama sistemlerinin deşarj olması, üretim maliyeti düşük olduğunda enerji depolama sistemlerini şarj etmeyi planlayan bir zamanlama problemine dönüştürmektedir (Alsharif ve ark., 2022; Kazemi ve Ansari, 2022).

Burada kullandığımız gösterimlerde küçük ve kalın simgeler vektörleri, büyük ve kalın simgeler ise matrisleri temsil etmektedir. Reel sayılar ve kompleks sayılar sırasıyla \mathbb{R} ve \mathbb{C} ile gösterilmektedir. \mathbb{S}^n ile $n \times n$ boyutundaki simetrik matrisler gösterilmektedir. (i, j) sıralı ikilisi bir matriste i.satır j. sütun elemanını temsil etmektedir. $(.)^T$ ve $(.)^*$ sırasıyla bir matrisin transpozunu ve eşlenik transpozunu ifade eder. $|\cdot|$ verilen ifadenin büyüklüğünü ifade ederken, $[\cdot]$ verilen matrisi temsil etmektedir.

Bu makalede AA mikro-şebekeler $\varphi(\omega, \varepsilon)$ şeklinde gösterilmektedir. Bu gösterimde sırasıyla ω ve ε sistemdeki baraların kümesini ve tüm iletim/dağıtım hatlarını ifade etmektedir. Dağıtım hatları enerji kaynaklarını baralar üzerinden son kullanıcıların yük taleplerine bağlar. Dağıtım hatlarındaki baralarda fiziksel kısıtlar dahilinde yük bağlanarak, enerji depolama sistemleri konumlandırılabilir. $\vec{E}, \bar{E} \in \{0,1\}^{|\mathbb{E}||x||\omega|}$ dağıtım hatlarında çakışım matrisini ve yönlerini gösterir. Eğer bir hat $h \in \omega, b \in \omega$ barasından başlıyorsa $\vec{E}_{h,b} = 1$ olarak gösterilir. Hat $h \in \omega, b \in \omega$ barasında bitiyorsa $\bar{E}_{h,b} = 1$ olarak gösterilir. M, \vec{M}, \bar{M} matris gösterimleri ise, bara iletkenliğini, hat-bara arası iletkenliği ve bara-hat arası iletkenliği göstermektedir. Güç dağıtım sisteminde hatlardaki güç akış limiti f^{max} ile ifade edilmektedir. Güç dağıtım sistemindeki jeneratör kümesi \mathbb{K} ile ifade edilir. Jeneratörler için çakışım matrisi K için $K \in \{0,1\}^{|\mathbb{K}||x||\varepsilon|}$ olarak tanımlanmaktadır. Eğer $k \in \mathbb{K}$ jeneratörü $m \in \omega$ barasında ise $K_{k,m} = 1$ dir. Güç dağıtım şebekesinde baradaki güç üretiminin vektörü $s_t^{SRC} \in \mathbb{C}^{|\mathbb{K}|}$, gerilim vektörü $v_t \in \mathbb{C}^{|\omega|}$ ve baralardaki talep vektörü $d_t \in \mathbb{C}^{|\omega|}$ ile gösterilmektedir. $v_t \in \mathbb{C}^{|\omega|}$ gerilim vektöründen bir üst boyut uzayında $W_t \in \mathbb{H}^{|\omega|}$ matrisi oluşmaktadır. Bu matriste π , $n \times n$ boyutundaki bir matrisin köşegen elemanlarını $n \times 1$ vektörüne götüren dönüşümü temsil etmektedir. Yani $[A]$ $n \times n$ boyutunda bir matris ve $[B]$ $n \times 1$ boyutunda bir sütun matrisi olmak üzere $\pi(a_{ii}) = b_i$ ve $\forall a_{ii} \in [A]$ için $b_i \in [B]$ olarak ifade edilen birebir fonksiyonu temsil etmektedir.

Güç dağıtım şebekelerinde enerji depolama sistemleri toplam üretim maliyetini en aza indirmeyi amaçlar. Bunun için barada jeneratörlerin gerilim, frekans ve güç ayar noktalarının belirlenmesine karar verir. Sisteme bağlanacak toplam enerji depolama sistemlerinin sayısının konumlarına ve sistemdeki şarj/deşarj zamanlamalarını belirler. Baradaki yükün günlük ortalama profili $t = (1, |T|)$ olarak ifade edilebilir. Burada T yük profilinin bir günlük yük miktarlarının belirlendiği zaman kümesini temsil eder. Yük profilinin zaman kümesindeki $t \in T$ için $v_t \in \mathbb{R}^{|\omega|}$ $t \in T$ anında düğüm gerilim

vektörünü, $p_t^{SRC} \in \mathbb{R}^{|\mathbb{K}|}$ $t \in T$ jeneratörden AA mikro-şebekeye aktarılan güç vektörünü göstermektedir. enerji depolama sistemindeki şarj/deşarj güç vektörü ise $t \in T$ için $p_t^{STR} \in \mathbb{R}^{|\omega|}$ olarak tanımlanır. Güç dağıtım sisteminde $t \in T$ anında $m \in \omega$ barasına yerleştirilmiş $l \in L$ enerji depolama sistemlerinin şarj ve deşarj oranları $r_{t,lm}^+$ ve $r_{t,lm}^-$ olarak gösterilir. Burada L güç dağıtım sisteminde konumlandırılacak enerji depolama sistemlerinin kümesini göstermektedir. $t \in T$ anında $m \in \omega$ barasındaki şarj kapasitesi $r_{t,m}^{STR}$ ile gösterilir. C_{lm} , l enerji depolama sisteminin m barasında olup olmadığını gösterir. Buna göre m barasında l enerji depolama sistemi varsa $C_{lm} = 1$, yoksa $C_{lm} = 0$ olarak formülize edilir. Amaç fonksiyonunun hedefi, üretimin toplam maliyetini en aza indirmektir. Öyle ki bu maliyet $t \in T$ için ikinci dereceden bir maliyet fonksiyonu olarak Eşitlik 1'deki şekilde ifade edilir.

$$\sum_{t \in T} (p_t^{SRC T} [a_t] p_t^{SRC} + b_t^T p_t^{SRC} + c_t^T \mathbf{1}_{\mathbb{K}}) \quad (1)$$

Yük profilinin zaman kümesindeki $t \in T$ için baralara giren veya baralardan çıkan güç vektörü $\pi\{v_t v_t^T M^T\} \in \mathbb{R}^{|\omega|}$ olarak tanımlanır. Benzer şekilde, hatlara giren veya hatlardan çıkan güç vektörleri ise sırasıyla $\pi\{\bar{E} v_t v_t^T \bar{M}^T\} \in \mathbb{R}^{|\varepsilon|}$ ve $\pi\{\vec{E} v_t v_t^T \vec{M}^T\} \in \mathbb{R}^{|\varepsilon|}$ olarak ifade edilir.

Yük profilinin zaman kümesindeki herhangi bir $t \in T$ için herhangi bir barada depolanan enerji miktarı Eşitlik 2'deki gibi hesaplanır.

$$r_{t,m}^{STR} = \sum_{l \in L} (r_{t,lm}^+ - r_{t,lm}^-) \forall m \in \omega \quad (2)$$

Burada $r_{t,lm}^+$ ve $r_{t,lm}^-$ pozitif değerli olup herhangi bir $t \in T$ için, sırasıyla l enerji depolama sisteminin m. baradan aldığı şarj gücünü ve l enerji depolama sisteminin m. barasına verdiği deşarj gücünü göstermektedir. Eğer m. barada yerleştirilmiş bir enerji depolama sistemi yoksa $r_{t,m}^{STR} = 0$ olacaktır. Bu durum enerji depolama sistemlerinin maksimum ve minimum şarj/deşarj kısıtı olup, kısıt ikili karar değişkenleriyle sıfır karar noktası için belirlenir ve Eşitlik 3 ve 4'deki gibi gösterilir.

$$r_{t,lm}^+ \leq r_{max;l}^+ C_{lm} \quad (3)$$

$$r_{t,lm}^- \leq r_{max;l}^- C_{lm} \quad (4)$$

Burada eğer $C_{lm} = 1$ ise $r_{t,lm}^-$ ve $r_{t,lm}^+$ maksimum şarj kapasitesiyle m. baraya yerleştirilir. Eğer $C_{lm} = 0$ ise m. barada enerji depolama sistemi bulunmuyor demektir. Bu durumda $r_{t,lm}^+ = 0$ ve $r_{t,lm}^- = 0$ 'dır.

Optimal enerji depolama sistemlerinin konumlandırılması toplam maliyetin minimize edilmesi için önemlidir. Optimal enerji depolama sistemlerinin konumunun belirlenmesi problemi bir MINLP ile Eitlik 5a'deki gibi formülize edilir.

$$\sum_{t \in T} (p_t^{SRC T} [a_t] p_t^{SRC} + b_t^T p_t^{SRC} + c_t^T \mathbf{1}_{\mathbb{K}}) \quad (5a)$$

Bu denklem için kısıtlar (Eşitlik 5b-5m);

$$\pi\{W_t Y^*\} + d_t = K^T S_t^{SRC} + p_t^{SRC} \quad (5b)$$

$$|\pi\{\vec{E}W_t \vec{M}^*\}| \leq f^{max} \quad (5c)$$

$$|\pi\{\vec{E}W_t \vec{M}^*\}| \leq f^{max} \quad (5d)$$

$$p^{min} \leq p_t^{SRC} \leq p^{max} \quad (5e)$$

$$q^{min} \leq q_t^{SRC} \leq q^{max} \quad (5f)$$

$$(v^{min})^2 \leq \pi\{W_t\} \leq (v^{max})^2 \quad (5g)$$

$$r_{t,m}^{STR} = \sum_{l \in L} (r_{t,lm}^+ - r_{t,lm}^-) \quad \forall m \in M \text{ and } \forall t \in T \quad (5h)$$

$$0 \leq r_{t,lm}^+ \leq r_{max;l}^+ C_{lm} \quad \forall l \in L, \forall m \in \omega, \forall t \in T \quad (5i)$$

$$0 \leq r_{t,lm}^- \leq r_{max;l}^- C_{lm} \quad \forall l \in L, \forall m \in \omega, \forall t \in T \quad (5j)$$

$$\sum_{m=1}^{|\omega|} C_{lm} = 1 \quad \forall l \in L \quad (5k)$$

$$e_t^{min} \leq \sum_{t \in T} \sum_{m \in \omega} (\mu^+ r_{t,lm}^+ - \mu^- r_{t,lm}^-) \leq e_t^{max} \quad \forall l \in L \text{ and } \forall t \in T \quad (5l)$$

$$W_t = v_t v_t^* \quad \forall t \in T \quad (5m)$$

Yukarıdaki ifadelerde kullanılan değişkenler (Eşitlik 6a-6d);

$$p_t^{SRC} \in \mathbb{R}^{|\mathbb{K}|}, q_t^{SRC} \in \mathbb{R}^{|\mathbb{L}|}, W_t \in \mathbb{H}^{|\omega|} \quad (6a)$$

$$r_{t,lm}^+, r_{t,lm}^-; \forall t \in T, \forall m \in \omega, \forall l \in L \quad (6b)$$

$$C_{lm} \in \{0,1\}; \forall l \in L, \forall m \in \omega \quad (6c)$$

$$s_t^{SRC} \in \mathbb{C}^{|\mathbb{K}|}, q_t^{SRC} \in \mathbb{C}^{|\mathbb{K}|} \quad (6d)$$

Denklem (6), tüm jeneratörlerin görünür güç vektörü, $s_t^{SRC} = p_t^{SRC} + q_t^{SRC} \in \mathbb{C}^{|\mathbb{K}|}$, aktif ve reaktif güç üretiminden oluşmaktadır. $p_t^{SRC} \in \mathbb{R}^{|\mathbb{K}|}, q_t^{SRC} \in \mathbb{R}^{|\mathbb{K}|}, s_t \in \mathbb{R}^{|\mathbb{K}|}$ sırasıyla jeneratörün aktif, reaktif ve görünür gücünü temsil eder. Eşitlik (7), jeneratörlerin toplam görünür gücü, aktif ve reaktif gücün toplamı olarak ifade edilen karmaşık bir vektör denklemdir.

$$s_t^{SRC} = p_t^{SRC} + q_t^{SRC} \in \mathbb{C}^{|\mathbb{K}|} \quad (7)$$

Eşitlik (5a), OGA problemi, (5b) de verilen konveks olmayan kısıt ile gerçekleştirilmiştir. Ancak, Eşitlik (5)'de verilen OGA problemi genelinde de doğrusal olmayan ve konveks olmayan bir problemidir.

Eşitlik (5a) ile verilen problemin çözümünü mümkün kılmak için; Eşitlik (5m), Eşitlik (8a ve 8b) ile gevşetilmiş MISOCP'ye dönüşümü sağlanmıştır. Bu dönüşümler ile problem konveks haline getirilerek çözümü gerçekleştirilebilir.

$$W_{t,ii} \times W_{t,ij} \geq |W_{t,ij}|^2 \quad \forall (i,j) \in \mathbb{E} \text{ and } \forall t \in T \quad (8a)$$

$$W_{t,ij} \geq 0 \quad i \in \omega, \forall t \in T \quad (8b)$$

3. Bulgular ve Tartışma

Dağıtım tesislerinde enerji depolama sistemlerinin konumlandırma optimizasyon çalışması Intel i9 işlemci ve 32 GB RAM ile donatılmış bir bilgisayar ile

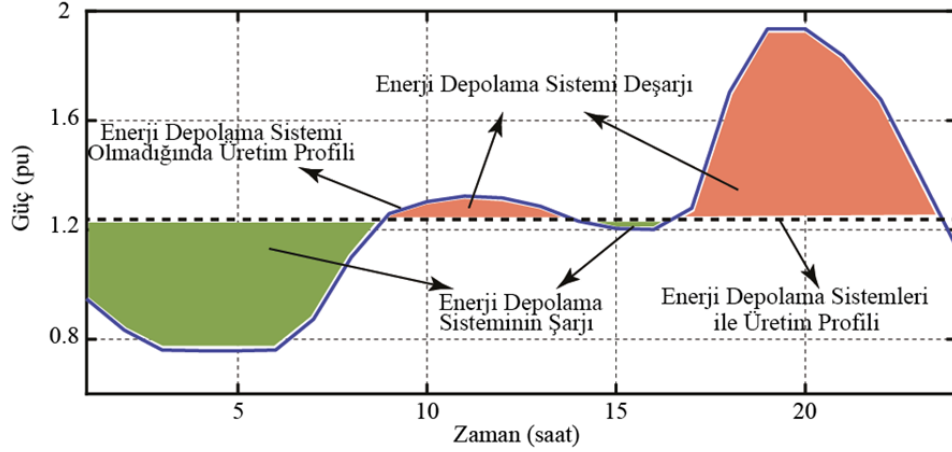
gerçekleştirilmiştir. Çalışma sırasında programlama arayüzü CVX v2.1, konik karmaşık tamsayı çözücüsü GUROBI v9.5.2 ve IEEE test veri setleri kullanılmıştır. Enerji depolama sistemlerinin kapasitesi puant talebin %10 ila %20'si arasında olduğu AA mikro-şebekelerde, seçili baralara farklı sayılarda enerji depolama sistemi konumlandırılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 1'de verilen Şarkışla / Sivas / Türkiye ilçesinin 24 saatlik ortalama yük tüketimi, IEEE test veri setlerinin ölçeklendirilmesi için kullanılmıştır. Önerilen enerji depolama sistemlerinin konumlandırma optimizasyon algoritması ile IEEE test veri setleri 9 baralı sistemlere uygulanmıştır. Çalışmada elde edilen ve karşılaştırılan tüm güç değerleri birim değerlere (pu-per unit) dönüştürülerek kullanılmıştır.

3.1. IEEE 9-baralı Dağıtım Sistemi

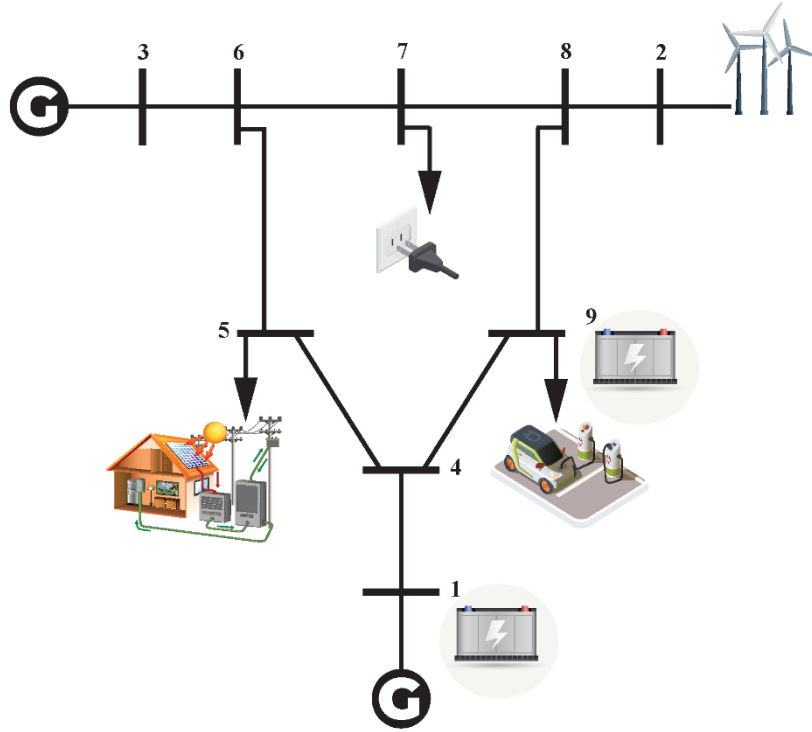
Bu bölümde, IEEE 9 baralı veri setleri ile sabit üretim tesislerinin yanında rüzgâr türbinlerinin de olduğu dağıtım tesisinde enerji depolama sistemlerinin konumlandırılmasını ve üretim profili düzleştirilmesiyle maliyetlerin azaltılması konusu incelenmiştir. Şekil 3'te gösterilen dağıtım sisteminde 1, 2 ve 3 numaralı baralarda üretim santralleri bulunmaktadır. Çalışmada farklı enerji depolama sistemlerinin kapasitelerinde ve kısıtlar ile maliyetin düşürülmesi için enerji depolama sistemlerinin konumlarının nasıl değiştiği incelenmiştir. IEEE 9 baralı test veri setleri incelendiğinde, sistemde üç yük barası ve üç üretim barası bulunmaktadır. Çalışmada, IEEE 9 baralı orijinal veri setinde ikinci baradaki geleneksel üretim tesisi Şekil 2'de verilen üretim profili için bir rüzgâr türbini ile değiştirilmiştir. Şekil 4 ile IEEE 9 baralı değiştirilmiş veri setindeki toplam yük profilinin değişimi, her bir yükün miktarı ve yük üzerindeki toplam yük için gösterilmektedir. Şekil 5'te, 9 baralı bir dağıtım tesisinin puant talebinin %10 ve %20'si için enerji depolama sistemlerinin kapasiteleri belirlenmiştir. Dağıtım hattı için farklı sayılarda seçilmiş enerji depolama sistemleri için (|L|) üretim profili |L| = 0,2,4,6 için toplam yük profilleri gösterilmektedir. Her grafik, enerji depolama sistemleri |L|= 0,2,4,6 sayısına bağlı olan dört farklı durumu göstermektedir. Buna göre sistemde enerji depolama sistemi olmadığına (mavi eğriler) ve altı enerji depolama sistemi kullanıldığında (yeşil eğriler) yük profili karşılaştırıldığında sistemdeki enerji depolama sistemi kullanımının önemi fark edilmektedir. Yük profili, enerji depolama sistemi konumlarının optimum belirlenmesiyle düzleştirilmiştir. Öte yandan, AA mikro-şebekesinde |L|= 0,2,4,6 enerji depolama sistemleri için şarj/deşarj profilleri gösterilmektedir. AA mikro-şebekede enerji depolama sistemi olmaması durumu ve |L|= 0,2,4,6 olan en uygun enerji depolama sistemi konumu için bir karşılaştırma yapılmıştır. |L| = 0, 2, 4, 6 enerji depolama sistemlerinin sayıları ve kapasitelerine göre şarj-deşarj miktarları Şekil 6'da verilmiştir. Sonuç olarak, sistemde enerji depolama sistemi olmadığına şarj miktarı sıfırdır (mavi eğriler) ve altı enerji depolama sistemi kullanıldığında (yeşil eğriler) şarj seviyeleri karşılaştırılmıştır. Mikro-şebekede seçilen

enerji depolama sistemleri kapasitesinin puant talep miktarının sırasıyla %10 ve %20'si seçildiği durumlar için enerji depolama sistemlerinin konumu, toplam maliyet, hesaplama süresi ve optimizasyon boşluğu $|L|=0, 2, 4$ ve 6 için Tablo 4 ve 5'te karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Toplamda en düşük maliyet altı enerji

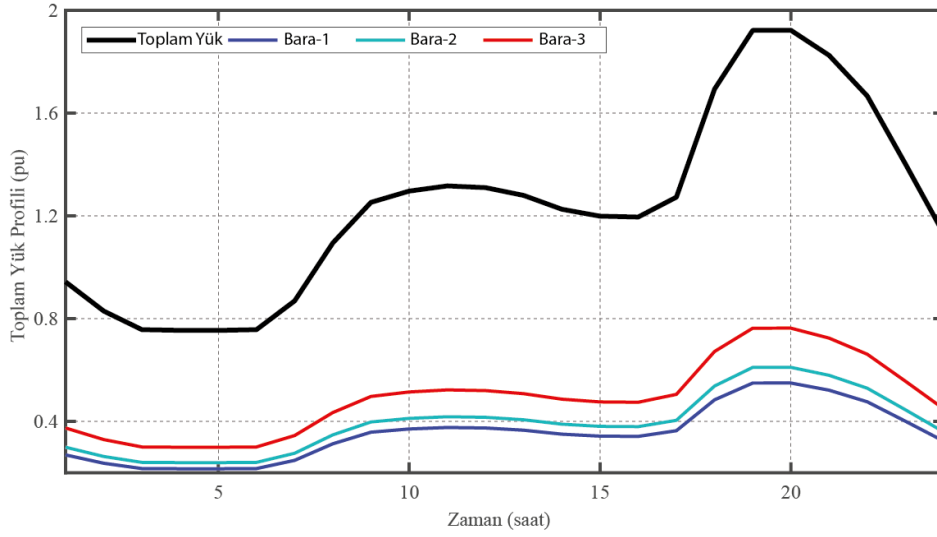
depolama sistemi ile sağlanmıştır. Ayrıca tabloda her bir baraya kaç adet enerji depolama sisteminin konumlandırılacağı da gösterilmektedir. Buna göre karşılaştırmalar $|L| = 6$ enerji depolama sistemleri sayısı için puant talebin sırasıyla %10 ve %20'sinde maliyetin en düşük seviyelerde olduğu gösterilmektedir.



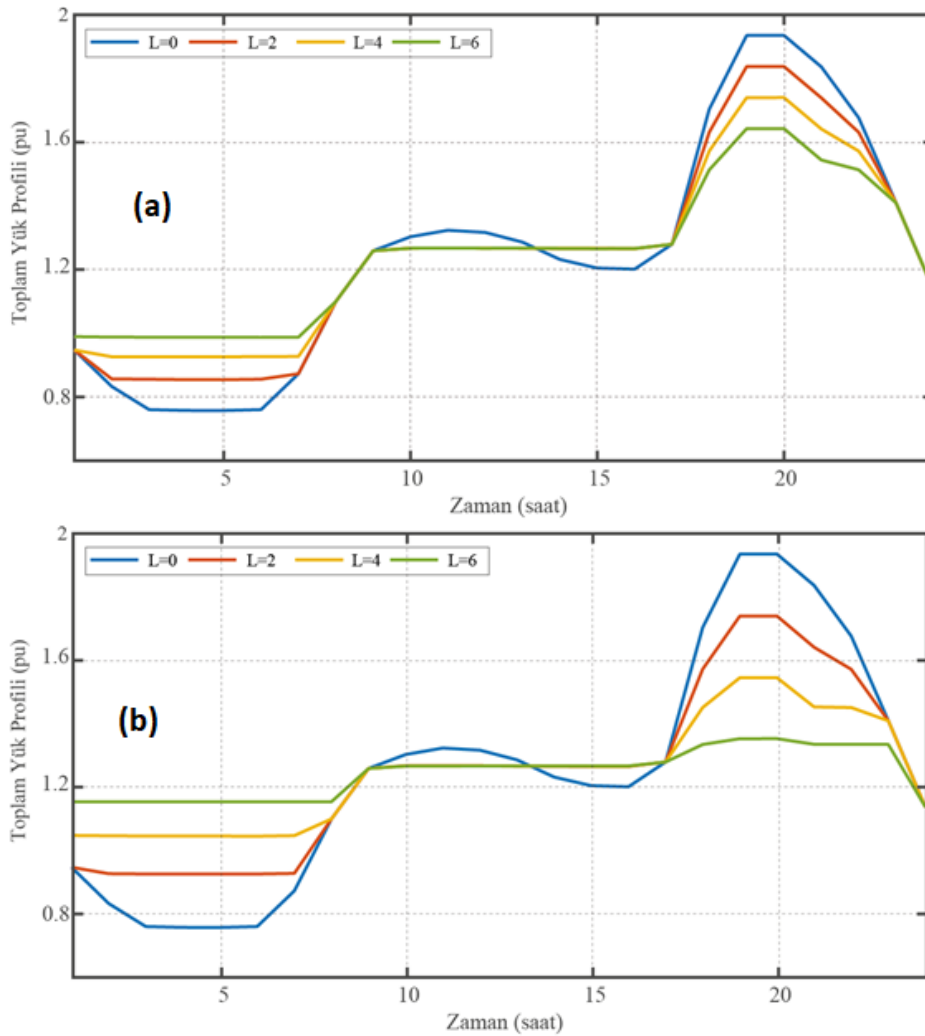
Şekil 2. Yeterli sayıda enerji depolama sistemine sahip ve önerilen algoritma ile doğru şekilde konumlandırılmış bir AA mikro-şebekesinde enerji depolama sistemlerinin düzleştirilmiş bir yük profilinde şarj/deşarj gösterimi.



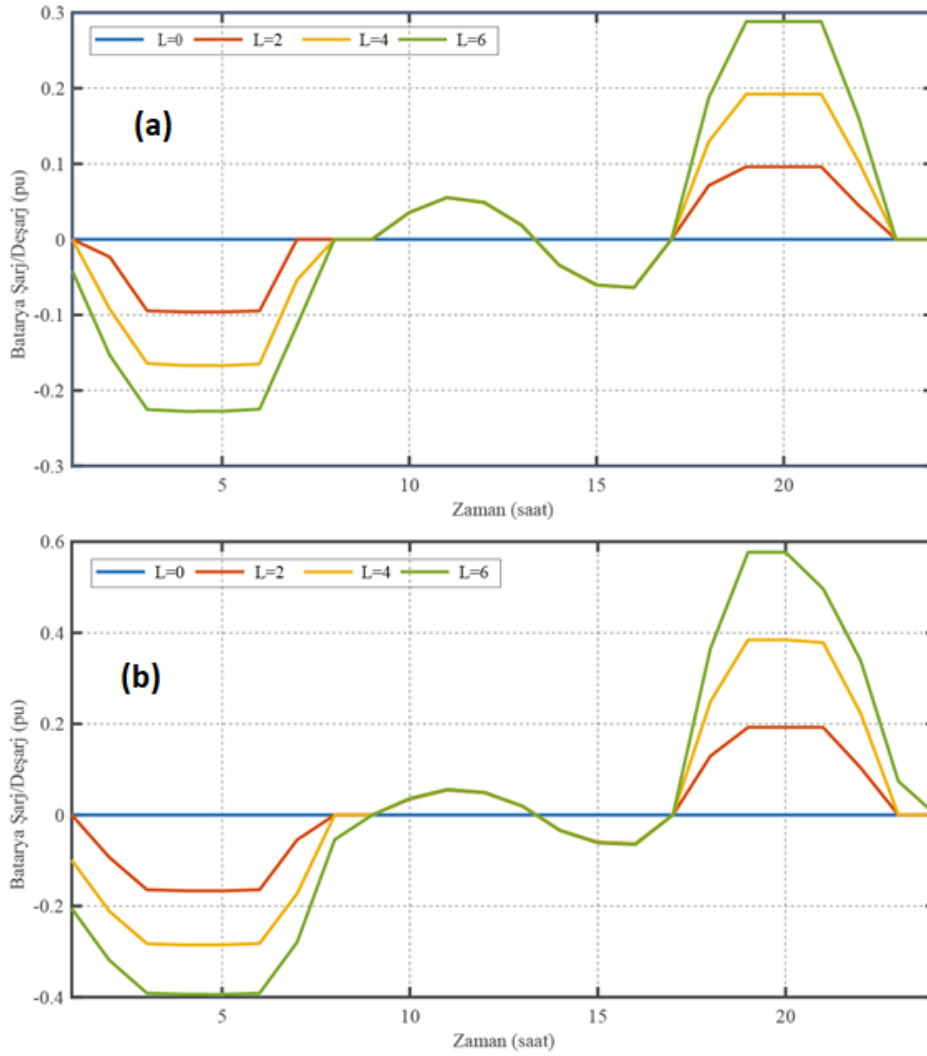
Şekil 3. Geleneksel ve yenilenebilir üretim santrallerinin olduğu iki enerji depolama sistemi konumlandırılmış 9 baralı bir dağıtım şebekesi örneği.



Şekil 4. 9 baralı bir sistemde IEEE test verileri kullanılarak örneklendirilen baralardaki yükler ve toplam yük profili.



Şekil 5. 9 Baralı bir dağıtım sisteminde $|L| = 0,2,4,6$ enerji depolama sistemi sayıları için üretim profili. (a) Enerji depolama sistemi kapasitesi sistemin maksimum talep değerinin %10'u olduğunda toplam yük profilindeki değişim. (b) Enerji depolama sistemi kapasitesi sistemin maksimum talep değerinin %20'si olduğunda toplam yük profilindeki değişim.



Şekil 6. 9 Baralı bir dağıtım sisteminde $|L| = 0,2,4,6$ enerji depolama sistemi sayıları için enerji depolama sistemi şarj/deşarj profili. (a) Enerji depolama sistemi kapasitesi sistemin maksimum talep değerinin %10'u olduğunda toplam yük profilindeki değişim. (b) Enerji depolama sistemi kapasitesi sistemin maksimum talep değerinin %20'si olduğunda toplam yük profilindeki değişim.

Tablo 1. Enerji depolama sistemi kapasitesi sistemin maksimum talep değerinin %10'u olduğunda; Enerji depolama sisteminin konumu, toplam maliyet, hesaplama süresi, optimizasyon başarısı.

Enerji Depolama Sistemi Sayısı	Enerji Depolama Sistemi Konumu	Toplam Maliyet	Hesaplama Süresi (s)	Optimizasyon Boşluğu
0	-	46288	2,38	% 0
2	9x1, 1x1	46001	29,82	% 0,0355
4	9x2, 5x1, 4x1	45767	35,40	% 0,0052
6	9x4, 5x1, 4x1	45577	51,41	% 0,0065

Tablo 2. Enerji depolama sistemi kapasitesi sistemin maksimum talep değerinin %20'si olduğunda; Enerji depolama sisteminin konumu, toplam maliyet, hesaplama süresi, optimizasyon başarısı

Enerji Depolama Sistemi Sayısı	Enerji Depolama Sistemi Konumu	Toplam Maliyet	Hesaplama Süresi (s)	Optimizasyon Boşluğu
0	-	46288	2,51	% 0
2	9x2	45767	13,58	% 0,0071
4	9x1, 4x1, 5x2	45430	34,90	% 0,0097
6	7x2, 9x2, 5x1, 4x1	45251	187,38	% 0,0071

4. Sonuç

Çalışmada, AA mikro-şebekelerde üretim maliyetlerinin azaltılması ve üretim profillerinin düzleştirilmesi için enerji depolama sistemlerinin yerleştirilmesinde MINLP olarak formülize edilen problem MISOCP olarak yeniden ifade edilmektedir. Önerilen yöntem, rüzgâr ve geleneksel üretim kaynaklarını kullanarak bir IEEE test verisi üzerinde karşılaştırmalı çalışmalarla doğrulanmıştır. Sonuçlar, önerilen yöntem kullanılarak optimize edilen enerji depolama sistemi konumlandırılmasıyla toplam maliyetteki değişiklikleri göstermektedir. AA mikro-şebekelerin üretim maliyetinin azaltılmasına ek olarak geleneksel jeneratörlerin üretim profilleri de düzleştirilmiştir. Bunun için seçilen enerji depolama sistemi boyutları ve konumları, IEEE test verilerinin operasyonel ve fiziksel kısıtlarına bağlı olarak belirlenmiştir. Dışbükey olmayan güç akışı denklemlerinin ve enerji depolama sistemleri konumlandırılmadaki ikili karar değişkenlerinin birlikte çözülmeye çalışılmasının neden olduğu karmaşıklık gevşetilmiş MISOCP programlamayla çözülmüştür. Önerilen programlama, rüzgâr türbini entegre edilmiş IEEE 9-baralı test sistemine uygulanmış ve sonuçlar elde edilmiştir. Sonuçlarda doğru enerji depolama sisteminin konumlandırılmasıyla üretim profillerinin düzleştirildiği ve toplam maliyetlerin düştüğü görülmektedir. Ayrıca vurgulamak gerekir ki bu çalışmanın bazı değişikliklerle doğru akım (DA) mikro-şebekelere de uygulanabilir hale kolaylıkla getirilebilir. Burada dikkat edilmesi gereken değişiklikler: iletim hatlarının tamamen resistif bir yapıda olması, reaktif güç değişkeninin denklemlerden çıkarılması ve faz açısı konseptinin DA uygulamalarında olmayacağı unutulmamalıdır.

Katkı Oranı Beyanı

Yazarın katkı yüzdesi aşağıda verilmiştir. Yazar makaleyi incelemiş ve onaylamıştır.

	T.A.
K	100
T	100
Y	100
VTI	100
VAY	100
KT	100
YZ	100
KI	100
GR	100
PY	100
FA	100

K= kavram, T= tasarım, Y= yönetim, VTI= veri toplama ve/veya işleme, VAY= veri analizi ve/veya yorumlama, KT= kaynak tarama, YZ= Yazım, KI= kritik inceleme, GR= gönderim ve revizyon, PY= proje yönetimi, FA= fon alımı.

Çatışma Beyanı

Yazar bu çalışmada hiçbir çıkar ilişkisi olmadığını beyan etmektedirler.

Etik Onay Beyanı

Bu çalışmada hayvanlar ve insanlar üzerinde herhangi bir çalışma yapılmadığı için etik kurul onayı alınmamıştır.

Kaynaklar

- Alsharif H, Jalili M, Hasan KN. 2022. Power system frequency stability using optimal sizing and placement of battery energy storage system under uncertainty. *J Energy Storage*, 50: 104610.
- Byrne RH, Nguyen TA, Copp DA, Chalamala BR, Gyuk I. 2017. Energy management and optimization methods for grid energy storage systems. *IEEE Access*, 6: 13231-13260.
- Calderaro V, Conio G, Galdi V, Massa G, Piccolo A. 2013. Optimal decentralized voltage control for distribution systems with inverter-based distributed generators. *IEEE Trans Power Syst*, 29(1): 230-241.
- Carpentier J. 1977. Optimal power flows. *Int J Electr Power Energy Syst*, 1(1): 3-15.
- Dui X, Zhu G, Yao L. 2017. Two-stage optimization of battery energy storage capacity to decrease wind power curtailment in grid-connected wind farms. *IEEE Trans Power Syst*, 33(3): 3296-3305.
- Dutta S, Sharma R. 2012. Optimal storage sizing for integrating wind and load forecast uncertainties. In: *Proceedings of IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies*, January 16-20, Washington DC, USA, pp: 1-7.
- Fossati JP, Galarza A, Martín A, Fontan L. 2015. A method for optimal sizing energy storage systems for microgrids. *Renew Energy*, 77: 539-549.
- Guo J, Zhang P, Wu D, Liu Z, Ge H, Zhang S, Yang X. 2021. A new collaborative optimization method for a distributed energy system combining hybrid energy storage. *Sustain Cities Soc*, 75: 103330.
- Hannan MA, Faisal M, Ker PJ, Begum RA, Dong ZY, Zhang, C. 2020. Review of optimal methods and algorithms for sizing energy storage systems to achieve decarbonization in microgrid applications. *Renew Sustain Energy Rev*, 131: 110022.
- Happ HH. 1977. Optimal power dispatch comprehensive survey. *IEEE Trans Power App Syst*, 96(3): 841-854.
- Huang S, Wu Q, Wang J, Zhao H. 2016. A sufficient condition on convex relaxation of ac optimal power flow in distribution networks. *IEEE Trans Power Syst*, 32(2): 1359-1368.
- Huang Y, Ju Y, Ma K, Short M, Chen T, Zhang R, Lin Y. 2022. Three-phase optimal power flow for networked microgrids based on semidefinite programming convex relaxation. *Appl Energy*, 305: 117771.
- Karimi H, Ansari J, Gholami A, Kazemi A. 2014. A comprehensive well to wheel analysis of plug-in vehicles and renewable energy resources from cost and emission viewpoints. In: *Proceedings of IEEE Smart Grid Conference*, November 3-6, Venice, Italy, pp: 1-6.
- Kayacık SE, Kocuk B. 2020. A misocp-based solution approach to the reactive optimal power flow problem. *IEEE Trans Power Syst*, 36(1): 529-532.
- Kazemi M, Ansari MR. 2022. An integrated transmission expansion planning and battery storage systems placement-a security and reliability perspective. *Int J Electr Power Energy Syst*, 134: 107329.
- Kekatos V, Wang G, Conejo AJ, Giannakis GB. 2014. Stochastic reactive power management in microgrids with renewables. *IEEE Trans Power Syst*, 30(6): 3386-3395.
- Kim J, Dvorkin Y. 2018. Enhancing distribution system resilience

- with mobile energy storage and microgrids. *IEEE Trans Smart Grid*, 10(5): 4996-5006.
- Li Y, Li T, Zhang H, Xie X, Sun Q. 2022. Distributed resilient double-gradient-descent based energy management strategy for multi-energy system under DoS attacks. *IEEE Trans Netw Sci Eng*, 9(4): 2301-2316.
- Morstyn T, Hredzak B, Aguilera RP, Agelidis VG. 2017. Model predictive control for distributed microgrid battery energy storage systems. *IEEE Trans Control Syst Technol*, 26(3): 1107-1114.
- Nick M, Cherkaoui R, Paolone M. 2017. Optimal planning of distributed energy storage systems in active distribution networks embedding grid reconfiguration. *IEEE Trans Power Syst*, 33(2): 1577-1590.
- Nojavan S, Majidi M, Esfetanaj NN. 2017. An efficient cost-reliability optimization model for optimal siting and sizing of energy storage system in a microgrid in the presence of responsible load management. *Energy*, 139: 89-97.
- Reddy KS, Mudgal V, Mallick TK. 2018. Review of latent heat thermal energy storage for improved material stability and effective load management. *J Energy Storage*, 15: 205-227.
- Stecca M, Elizondo LR, Soeiro TB, Bauer P, Palensky P. 2020. A comprehensive review of the integration of battery energy storage systems into distribution networks. *IEEE Open J Ind Electron Soc*, 1: 46-65.
- Tian Z, Wu W, Zhang B, Bose A. 2016. Mixed-integer second-order cone programming model for var optimisation and network reconfiguration in active distribution networks. *IET Gener Transm Distrib*, 10(8): 1938-1946.
- Wong LA, Ramachandaramurthy VK, Taylor P, Ekanayake JB, Walker SL, Padmanaban, S. 2019. Review on the optimal placement, sizing and control of an energy storage system in the distribution network. *J Energy Storage*, 21: 489-504.
- Yang L, Li X, Sun M, Sun C. 2023. Hybrid policy-based reinforcement learning of adaptive energy management for the energy transmission-constrained island group. *IEEE Trans Industr Inform*, 19(11): 10751-10762.
- Yang Y, Bremner S, Menictas C, Kay M. 2018. Battery energy storage system size determination in renewable energy systems: A review. *Renew Sustain Energy Rev*, 91: 109-125.
- Zia MF, Elbouchikhi E, Benbouzid M, Guerrero JM. 2019. Energy management system for an islanded microgrid with convex relaxation. *IEEE Trans Ind Appl*, 55(6): 7175-7185.
- Zidar M, Georgilakis PS, Hatzigiargyriou ND, Capuder T, Škrlec D. 2016. Review of energy storage allocation in power distribution networks: applications, methods and future research. *IET Gener Transm Distrib*, 10(3): 645-652.