

Paylaşılan enerji depolaması ve yenilenebilir enerji kapsamında birden fazla tüketici içeren aktif bir enerji topluluğu için iki katmanlı iç içe geçmiş bir oyun portföy standartları

Yaxin Tan ^(a), Weisheng Xu ^{(a) (a.) (b)}, Zhiyu Xu ^{(.) (c) (.) (*)}, Ruining Tong ^(.), Yuanbo Zhang ^{(a) (id)}

^aElektronik ve Bilgi Mühendisliği Fakültesi, Tongji Üniversitesi, Şangay 201804, Çin

^bBilişim Ofisi, Tongji Üniversitesi, Şangay 200092, Çin

^cÇin-Alman Akıllı Bilimler ve Teknoloji Araştırma Merkezi (CDFIWT), Tongji Üniversitesi, Şangay 201804, Çin

ARTICLE INFO

Anahtar kelimeler:

Paylaşımlı enerji depolama (SES) Prosumer
İç içe oyun
Asimetrik Nash pazarlığı Yenilenebilir portföy standartları (RPS)

ABSTRACT

Yenilenebilir portföy standartları (RPS), yenilenebilir enerjinin yeni nesil elektrik şebekesine yüksek düzeyde nüfuz etmesi sorununa umut verici bir çözüm sunmaktadır. Paylaşımlı enerji depolama (SES), RPS gerekliliklerini yerine getirmede profesyonel tüketicilere önemli ölçüde yardımcı olan çok önemli bir yenilik olarak ortaya çıkmıştır. Bu makale, aktif bir enerji topluluğunda SES ve üreticiler arasındaki ve harici ana şebeke, hidroelektrik santrali ve rüzgar çiftliği ile olan etkileşimleri yakalamak için iki katmanlı iç içe bir oyun modeli önermektedir. Üst katmanda, SES'in elektrik fiyatları sunarak kârı maksimize eden lider olarak hareket ettiği, tüketici ittifakının ise talep yanıtı ve eşler arası (P2P) enerji alışverişi yoluyla fiyatlara yanıt veren takipçi olduğu bir Stackelberg oyun modeli kurulmuştur. Alt katmanda, tüketici ittifakı için bir işbirliği oyunu oluşturulur, bireysel tüketicilerin katkıları puanlanır ve tüketici ittifakı içindeki toplam gideri adil bir şekilde dağıtmak için asimetrik Nash pazarlığı kullanılır. Gizliliğin korunması için alternatif yönlü çarpanlar yöntemi (ADMM) benimsenmiştir. Güneybatı Çin'deki gerçek bir aktif enerji topluluğuna ilişkin bir vaka çalışması, önerilen modelin farklı koşullar altında etkinliğini ve sağlamlığını göstermektedir. Hesaplama sonuçları ayrıca modelin daha fazla istikrar sağladığını, üreticilerin giderlerini azalttığını ve SES'e olan bağımlılığını azalttığını doğrulamaktadır.

1. Giriş

Çin, küresel enerji krizini ve sera gazı emisyonlarını ele almak için, karbon zirvesine ve karbon nötrlüğüne ulaşmayı amaçlayan iddialı "çift karbon" hedefini uygulamaya koymuştur [1]. Akıllı şebekeler çerçevesinde, dağıtılmış yenilenebilir enerjinin talep tarafına büyük ölçekli entegrasyonu, geleneksel tüketicileri düşük öngörülebilirlik ve kontrol edilebilirlik ile karakterize edilen yeni profesyonel tüketicilere dönüştürmektedir. Enerji alanında, profesyonel tüketiciler elektrik şebekesinin hem elektrik üretebilen hem de tüketebilen çift rollü son kullanıcıları olarak hareket etmektedir. Bu arada, bilgi alanında, üreticiler aktif olarak veri toplayabilen, sistem durumlarını analiz edebilen ve bireysel karı en üst düzeye çıkarmak için üretim veya tüketim davranışlarını optimize edebilen otonom akıllı ajanlar olarak işlev görür. Toplu olarak, çok sayıda profesyonel tüketici akıllı şebekedeki aktif enerji topluluğunu oluşturur ve eşler arası (P2P) enerji işlemlerine katılır. Düşük kirlilik ve yüksek verimlilik avantajlarına rağmen, yenilenebilir enerjilerin azalan ve öngörülemez doğası

güç sisteminin kararlılığı ve güvenliği için önemli zorluklar oluşturmaktadır [2,3].

İsmlendirme

Kısaltmalar

RPS	Yenilenebilir portföy standartları
SES	Paylaşılan enerji depolama
ADMM	Çarpanların alternatif yön yöntemi P2P
	Peer-to-peer
PV	Fotovoltaik

Parametreler

T, t	Zaman aralıkları kümesi ve bir zaman aralığının indeksi
Δt	Her bir zaman aralığının süresi (Birim: saat)
$\mathbb{I}, i$	Profesyonel tüketiciler kümesi ve bir profesyonel tüketici indeksi
θ	Bir profesyonel tüketicinin RPS kotası
φ	İttifaktaki bir profesyonel tüketicinin katkı puanı $\eta(s_+)$
$\eta(s_+)$	SES şarj ve deşarj verimliliği Karar değişkenleri
$r, \mathbf{r}$	Elektrik fiyatı (Birim: CNY/kWh) ve ilgili vektör
$\mathbf{P}, \mathbf{P}$	Elektrik gücü (Birim: kW) ve ilgili vektör
Q	SES'te depolanan elektrik enerjisi (Birim: kWh)

(devamı sonraki sayfada)

* Sorumlu yazar.

E-posta adresi: xuzhiyu@tongji.edu.cn (Z. Xu).

<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2025.110748>

Alındı 8 Ocak 2025; Gözden geçirilmiş haliyle alındı 5 Nisan 2025; Kabul edildi 7 Mayıs 2025

Çevrimiçi olarak mevcuttur 19 Mayıs 2025

0142-0615/© 2025 Yazarlar. Elsevier Ltd. tarafından yayınlanmıştır. Bu makale CC BY-NC-ND lisansı altında açık erişimli bir makaledir (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

İsmlendirme yeniden	
ABD+ -ABD-	SES'in şarj/deşarj durumunu gösteren Boolean değişkeni
US2C- UC2S	SES ile SES arasındaki işlem durumunu gösteren boolean değişkeni prosumers
Adlandırma kuralları	
"S", "C", "H", "W", "G" alt simgeleri SES, üreticiler ve hidroelektrik santralini ifade etmektedir, sırasıyla rüzgar santrali ve harici ana şebeke.	
"r" alt simgesi belirli bir profesyonel tüketicisini ifade eder.	
Üst simge "t", belirli bir zaman aralığı ile ilişkiyi gösterir.	
Değişkenlerin üzerindeki ve altındaki çubuklar sırasıyla üst ve alt sınırları göstermektedir.	
Üst simge "[k]" k-inci yinelenmeli güncellemeyi gösterir.	

Yenilenebilir Portföy Standartları (RPS) şu anda yenilenebilir enerji entegrasyonunu teşvik etmek için baskın politikadır. RPS, doğrudan yenilenebilir enerji tüketimi veya yeşil sertifikaların satın alınması yoluyla elde edilebilen, her bir kuruluş için belirli bir yenilenebilir enerji tüketimi kotasını zorunlu olarak şart koşmaktadır [4]. Kapsamlı çalışmalar RPS'yi tanım, geliştirme, çalışma prensipleri, tasarım çerçeveleri ve vaka çalışmaları açısından incelemiştir [5,6]. Bu araştırmalar, RPS'nin güç kaynağı yapılarını optimize etmede [7], yenilenebilir enerji kapasitesini artırmada [8], sosyal maliyetleri azaltmada [9], yenilenebilir enerji gelişimine yatırım çekmede [10,11] ve toptan elektrik fiyatlarını düşürmede [12] etkinliğini göstermiştir. RPS Avustralya [13], Amerika Birleşik Devletleri [14], Batı Avrupa [15] ve Japonya'da [16] başarıyla uygulanmıştır.

Bununla birlikte, serbest tüketicilerin hızlı büyümesi, yenilenebilir enerji arzında hem fazlalıklara hem de eksikliklere yol açmaktadır. Sistem istikrarını korumak için, fotovoltaik (PV) ve rüzgar enerjisi üretimi sıklıkla kısımla ve bu da önemli miktarda yenilenebilir enerji israfına neden olmaktadır [2]. Ayrıca, yenilenebilir enerji arzı ile yük talebi arasındaki uyumsuzluklar, üreticilerin RPS kotalarını yerine getirme çabalarını zorlaştırmaktadır. Enerji depolama sistemleri, kesintili yenilenebilir enerji üretimini tamponlayabilen ve güç sistemlerinin esnekliğini ve dayanıklılığını artırabilen temel kaynaklardır [17,18]. Ancak, her ne kadar fiyatlar düşüyor olsa da, yüksek yatırım ve bakım maliyetleri nedeniyle çok sayıda küçük kapasiteli üreticinin bağımsız olarak özel enerji depolama sistemlerine sahip olması ve işletmesi ekonomik olarak uygun değildir [19].

Ortaya çıkan ortak enerji depolama (SES) kavramı, aktif enerji topluluğu içinde enerji depolama sistemlerinin kullanımını artırmak için uygun bir çözüm sunmaktadır. SES, yenilenebilir enerji konaklamasını iyileştirerek ve enerji işleminden elde edilen geliri artırarak ekonomik faydalar sağlar [20,21]. Topluluktaki SES, talebin daha yüksek kullanımını sağlar [22], işletme maliyetini düşürür, yük profillerinde pik tırışlama sağlar [23]. Ayrıca, endüstriyel parklarda SES, rüzgar ve güneş enerjisi gibi fazla yenilenebilir enerji tüketimini desteklemektedir [24]. Çalışmalar, SES'in arz tarafına entegre edilmesinin yenilenebilir enerji santrallerine olan bağımlılığı azaltabileceğini ve sosyal refahı artırabileceğini göstermiştir [25]. Ayrıca, [26]'da önerilen SES için bir maliyet-fayda optimizasyon modeli, enerji perakendecilerinin maliyetlerini etkili bir şekilde azaltma potansiyelini göstermektedir. Topluluk enerji verimliliği perspektifinden bakıldığında, [27]'de önerilen oyun teorisi tabanlı bir P2P enerji paylaşımı yönetim modeli, enerji verimli bina topluluklarını yönetmek için yeni bir yaklaşım sunmaktadır. SES'in teorik ve pratik avantajlarına rağmen [28], az sayıda çalışma SES'in RPS gibi mevcut emisyon düzenleme politikalarıyla koordinasyonunu araştırmıştır. Elektrikğin piyasalaştırılması bağlamında, fiyatlandırma gibi ekonomik önlemler, üreticiler arasında işbirliğine dayalı planlama için gereklidir. Bu nedenle, yerelde RPS kapsamında üreticilerin karşılaştığı yenilenebilir enerji tüketimi zorluklarını ele almak için SES'i tanıtmak çok önemlidir.

Elektrikğin piyasalaştırılması, aşağıdaki unsurlar arasındaki bağlantıyı yoğunlaştırmıştır enerji kaynakları ve yükleri, geleneksel dikey olarak düzenlenmiş yapıyı birden fazla özerk piyasa katılımcısını içeren aktif bir topluluğa dönüştürmektedir [29]. Sonuç olarak, geleneksel merkezi yaklaşımlar P2P etkileşimini tanımlamak [30] veya karmaşık problemleri çözmek [31], özellikle de farklı görevlerin olduğu dinamik ortamlarda [32] yetersiz kalmaktadır. Bağımsız paydaşlar olarak, SES ve profesyonel tüketiciler

her biri kendi çıkarlarını gözetir ve bireysel faydalarını maksimize etmeye çalışır. Ancak, koordinasyonsuz rekabet genellikle bilgi asimetrisinden kaynaklanır ve piyasa etkinliğini ciddi ölçüde azaltır [33]. Oyun teorisi ve çoklu ajan sistemi bu zorlukların üstesinden gelmek için etkili metodolojiler olarak kabul edilmektedir [34]. Yüksek paralellik özelliğine rağmen, çoklu etmen sistemi kaynak yoğun ve zaman alıcıdır, bu da operasyonel çatışmalara yol açabilir [35]. Buna karşılık, oyun teorisi daha güçlü yorumlanabilirlik, daha basit modeller ve daha az hesaplama kaynağı gereksinimi ile daha akıcıdır [36]. Bu makalede incelenen gerçek dünya vakasının problem ölçeği göz önüne alındığında, oyun teorisini birincil metodoloji olarak benimsiyoruz.

Oyun teorisi, katılımcılar arasındaki stratejik etkileşimleri tanımlamak için çeşitli modelleri kapsar. Örneğin, işbirlikçi olmayan oyunlar bireysel rasyonalite ve karar verme sürecine odaklanarak kişisel çıkarları maksimize etmeyi amaçlarken, işbirlikçi oyunlar optimum genel faydayı elde etmek için kolektif çıkarları göz önünde bulundurur [37]. Çok sayıda çalışma, enerji ticareti problemlerini ele almak için oyun teorisi yaklaşımları önermiştir. [38]'de, çatışan çıkarlara sahip katılımcılar arasındaki elektrik işlemleri için, çoklu mikro şebeke sisteminin lider ve yük toplayıcının takipçi olarak hareket ettiği bir Stackelberg oyun modeli oluşturulmuştur. Ekonomik verimliliği artırmak için, entegre enerji hizmet sağlayıcılarının operasyonel maliyetlerini azaltmak için bir işbirlikçi oyun modeli oluşturulmuştur [39]. Talep tarafı katılım kaynakları için piyasa tabanlı bir işletme mekanizması, enerji şirketleri ve talep tarafı katılım yeteneğine sahip tüketiciler arasındaki stratejik etkileşimleri analiz etmek için oyun teorisi kullanılarak geliştirilmiştir [40]. Birbirine bağlı mikro şebekeler arasında P2P enerji için işbirlikçi bir oyun modeli tanıtılmış, adil kar tahsis ve optimum sistem verimliliği elde etmek amacıyla elektrik, ısı ve gaz işlemleri ele alınmıştır [41]. Bu çalışmalar, oyun teorisinin stratejik davranışları sistematik olarak analiz etmek, kaynak tahsisini optimize etmek ve adil ve verimli bir piyasa mekanizması sağlamak için sağlam bir çerçeve sağladığını göstermektedir.

Çarpanların alternatif yön metodu (ADMM) bir optimizasyon tekniği, büyük bir küresel problemi yardımcı ve Lagrange çarpanları ekleyerek çok sayıda küçük, bağımsız alt probleme ayırır. Bu alt problemler, her hesaplama adımı sırasında yalnızca sınırlı veri alışverişi ile yerel olarak ve yinelenmeli olarak çözülür, böylece gizlilik koruması geliştirilir [42,43]. ADMM özellikle veri gizliliğinin söz konusu olduğu dağıtık optimizasyon senaryoları için uygundur.

Bu makale, RPS kapsamında yenilenebilir enerji entegrasyonunun zorluklarına yanıt olarak, piyasa katılımcıları arasındaki rekabetçi ve işbirlikçi etkileşimleri simültane olarak ele alan iki katmanlı bir iç içe oyun modeli önermektedir. Çalışmamızın katkısı aşağıdaki gibi özetlenebilir:

(1) İki katmanlı iç içe oyun çerçevesi:

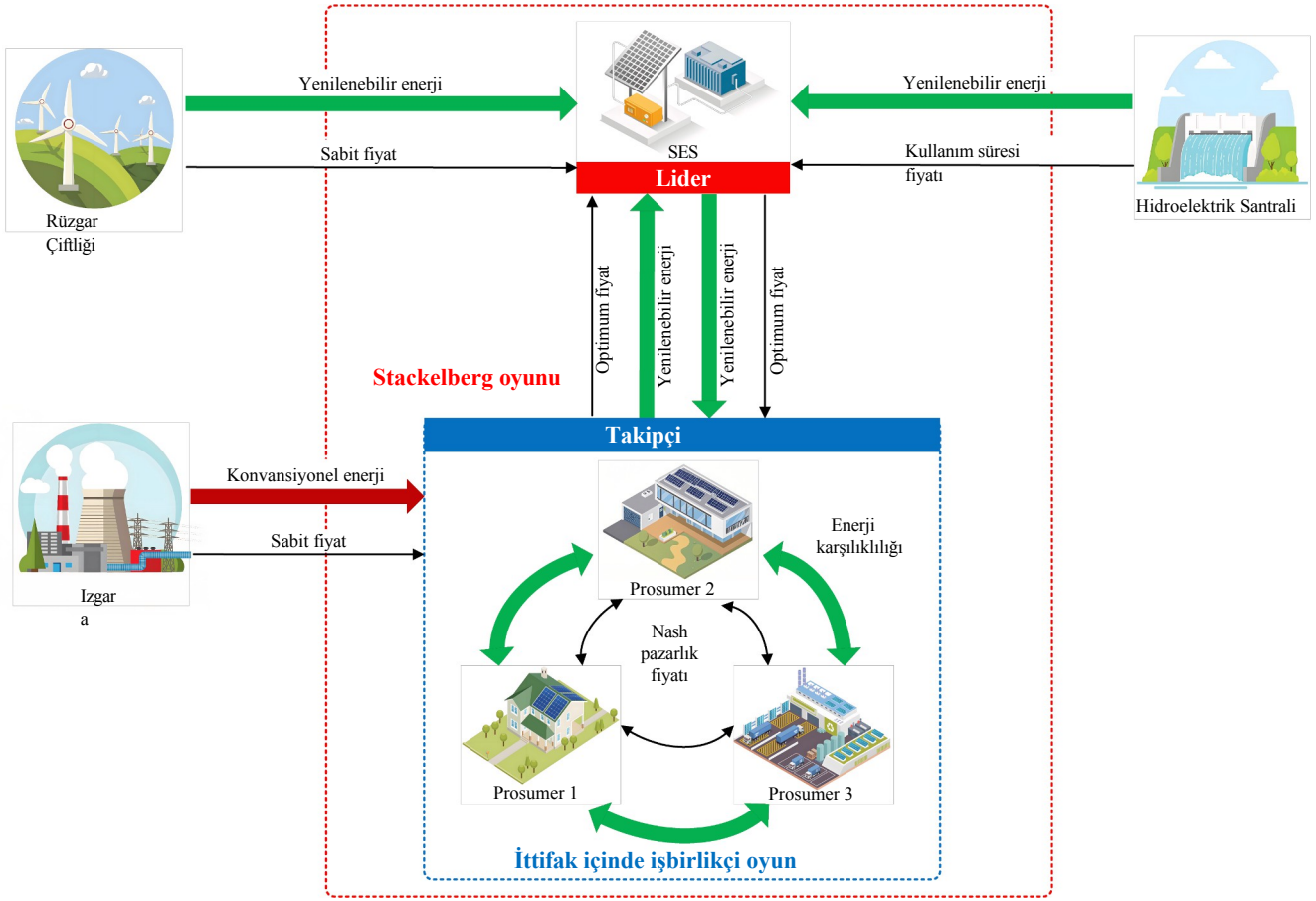
Elektrik işlemlerini kolaylaştırmak ve RPS gereklilikleri altında çeşitli üreticiler arasında yenilenebilir enerji uyumunu geliştirmek için iki katmanlı bir iç içe oyun çerçevesi önerilmektedir.

(2) Üst katman Stackelberg oyunu:

Üst katman modeli, SES (lider) ve tüketici ittifakı (takipçi) arasındaki rekabetçi etkileşimi RPS altında fiyat teklif etme ve yanıt verme yoluyla ele almak için bir Stackelberg oyunu kullanmaktadır. Elde edilen denge her iki tarafa da fayda sağlamaktadır.

(3) Alt katman işbirlikçi oyunu:

Alt katman modeli işbirlikçi bir oyun benimser, her bir tüketicinin katkısı değerlendirilir. Adil tahsis ve gizliliğin korunmasını sağlamak için asimetrik Nash baremi ve ADMM algoritması uygulanmaktadır.



Şekil 1. Aktif enerji topluluğunda iki katmanlı iç içe geçmiş oyunun şematik diyagramı.

(4) Vaka çalışması ve doğrulama:

Önerilen modelin etkinliğini, sağlamlığını ve pratik avantajlarını değerlendirmek için Güneybatı Çin'de gerçekçi bir vaka incelenmiştir. Sonuçlar, RPS kapsamında yenilenebilir enerjinin yerel işlem ve uyumunun iyileştirilmesi için değerli içgörüler ve referanslar sağlamaktadır.

Bu makalenin geri kalanı aşağıdaki şekilde düzenlenmiştir. Bölüm 2'de problem tanımlanmakta ve iki katmanlı iç içe oyun modeli formüle edilmektedir. Bölüm 3 çözüm sürecini göstermektedir. Bölüm 4'te nicel analiz ve tartışma için gerçekçi bir vaka çalışması yapılmıştır. Son olarak, Bölüm 5'te sonuçlara ilişkin değerlendirmeler yer almaktadır.

2. Problem formülasyonu

2.1. Oyun ve oyuncular

Şekil 1'de gösterildiği gibi aktif bir enerji topluluğu düşünün. Bu topluluk, bir SES ve birden fazla tüketici içerirken, harici varlıklar arasında ana şebeke, bir hidroelektrik santrali ve bir rüzgar çiftliği bulunmaktadır. Tüm varlıklar bağımsızdır ve farklı taraflarca yatırım yapılmakta ve işletilmektedir.

Ana şebeke, sabit bir fiyat üzerinden serbest tüketicilere konvansiyonel enerji (öncelikle termal enerji) tedarik etmektedir. Ana şebekeden gelen enerji yalnızca üreticilerin yük talebini karşılamak için tüketilebilir, ancak RPS kotasını karşılamak için uygulanamaz.

Hidroelektrik santrali, SES'e kullanım zamanı fiyatıyla yenilenebilir enerji (hidroelektrik) sağlamaktadır. Hidroelektrik santralinden elde edilen enerji hem yük talebini hem de RPS kotasını karşılamak için tüketilebilir.

Rüzgar çiftliği, SES'e sabit bir fiyatla yenilenebilir enerji (rüzgar enerjisi) sağlamaktadır. Rüzgar çiftliğinden elde edilen enerji hem yükü karşılamak hem de

talep ve RPS kotasının karşılanması.

SES, fazla enerji (üreticiler, hidroelektrik santrali ve rüzgar çiftliğinden) düşük fiyatlarla mevcut olduğunda şarj eden ve üreticiler tatmin edilmemiş taleple karşılaştığında deşarj eden yenilenebilir enerji için büyük bir tampondur. SES, şarj ve deşarj arasındaki fiyat farklarından yararlanarak kâr maksimize etmeyi amaçlamaktadır. Sadece yenilenebilir (hidrolik/rüzgar/güneş) enerji SES'te şarj edilebildiğinden veya SES'ten deşarj edilebildiğinden, hem yük talebini karşılamak hem de RPS kotasını tamamlamak için üreticilerin SES ile ticaret yapması yararlıdır.

Profesyonel tüketiciler, hem elektrik tüketebilen hem de üretebilen çift rollü varlıklardır. Tüketiciler kümesi şu şekilde gösterilir

$\mathbb{I} = \{i\}_{i=1}^n$. Tüketicinin yalnızca yenilenebilir enerji ürettiğine dikkat edin kendi PV'leri ile. Her bir tüketiciye, tüketilen yenilenebilir enerjinin toplam tüketime minimum oranını belirleyen belirli bir RPS kotası atanır. Her bir tüketici, RPS kısıtlamasına tabi olarak elektrik giderini en aza indirir.

Bir tüketici enerji talebini dört şekilde karşılayabilir:

1. kendi yenilenebilir enerji (PV) üretimini tüketiyor,
2. diğer profesyonel tüketicilerden yenilenebilir enerji (PV) satın almak,
3. SES'ten yenilenebilir enerji (hidrolik ve rüzgar) satın almak,
4. ana şebekeden konvansiyonel enerji satın almak.

Yalnızca ilk üç yolun RPS kotasının tamamlanmasına katkıda bulunduğu dikkat edin. Ana şebekeden satın alınan konvansiyonel enerji, RPS kotasının tamamlanması için uygun değildir.

Bir tüketici ayrıca fazla yenilenebilir enerji üretimini diğer üreticilere veya SES'e satabilir ve böylece ek gelir elde edebilir.

Sonuç olarak, bir tüketici diğer tüketicilerle işbirliği yaparak ve elektrik talebini değiştirerek elektrik giderini en aza indirebilir.

SES tarafından sunulan değişen fiyatlara yanıt. Ve işbirliğinin faydaları, her bir tüketiciye işbirliği ittifakındaki katkısına göre tahsis edilebilir.

Aktif bir enerji topluluğundaki etkileşim hiyerarşik iç içe geçmiş bir oyunla tanımlanabilir. Üst katman Stackelberg oyununda, SES ve tüketici ittifakı sırasıyla fiyat sunan lider ve fiyata yanıt veren takipçidir. Alt katmandaki işbirlikçi oyunda

oyununda, eşler arası (P2P) ittifak oluşturulur, her bir tüketicinin ittifaka bireysel katkısı değerlendirilir ve işbirliğinin faydaları üreticiler arasında paylaşılır.

İç içe geçmiş oyunun bir dizi ayrık oyun üzerinde gerçekleştirildiği varsayılmaktadır.

T ile gösterilen zaman dilimleri = $\{t\}_{t=1}^T$ her biri Δt süreli.

2.2. Üst katmanda Stackelberg oyunu

2.2.1. SES'in amaç fonksiyonu

Stackelberg oyununun lideri olarak SES, F_S karını maksimize etmeyi amaçlar fiyatlandırma stratejisini optimize ederek.

$$\max F_S = \max_{r(S2C), r(C2S), r(H2S), r(W2S)} \quad (1)$$

Burada F_{S2C} SES'in tüketici ittifakına elektrik satışından elde ettiği geliri, $F_{(C2S)}$, $F_{(H2S)}$ ve $F_{(W2S)}$ ise SES'in tüketici ittifakına elektrik satışından elde ettiği gideri göstermektedir. sırasıyla tüketici birliğinden, hidroelektrik santralinden ve rüzgar çiftliğinden elektrik satın alıyor.

$$F_{\alpha\beta} = \sum_{t \in T} r^t_{\alpha\beta} P^t_{\alpha\beta} \Delta t, \alpha\beta \in \{S2C^{(t)}, C2S^{(t)}, H2S^{(t)}, W2S^{(t)}\} \quad (2)$$

Burada r ve P sırasıyla işlem fiyatı ve gücüdür. t (üst simge olarak) ve i (alt simge olarak) zaman dilimlerinin indeksleridir ve sırasıyla üreticiler. ' $\alpha\beta$ ' enerji işleminin ' α 'dan ' β 'ya olduğunu gösterir.

2.2.2. SES'in Kısıtlamaları

(1) Güç kısıtlamaları

$$0 \leq P^t_{S+} \leq U^t_{S+} \bar{P}_S \quad (3)$$

$$0 \leq P^t_{S-} \leq U^t_{S-} \bar{P}_S \quad (4)$$

$$U^t_{S+} + U^t_{S-} \leq 1, U^t_{S+}, U^t_{S-} \in \{0, 1\} \quad (5)$$

$$0 \leq P^t_{S2C} \leq U^t_{S2C} \bar{P}_X \quad (6)$$

$$0 \leq P^t_{C2S} \leq U^t_{C2S} \bar{P}_X \quad (7)$$

$$U^t_{S2C} + U^t_{C2S} \leq 1, U^t_{S2C}, U^t_{C2S} \in \{0, 1\} \quad (8)$$

$$P^t_{S+} - P^t_{S-} = P^t_{C2S} + P^t_{H2S} + P^t_{W2S} - P^t_{S2C} \quad (9)$$

Eşitlik (3)-(4) ve Eşitlik (6)-(7), SES'in şarj/deşarj gücünün ve SES ile üreticiler arasındaki işlem gücünün sınırlı olduğunu göstermektedir. Eşitlik (5) ve Eşitlik (8) şarj vedeşarj güçlerinin uyumsuzluğunu göstermektedir. boşaltma ve aynı zaman aralığında SES ile alışı ve satış yapma. Eşitlik (9) SES'in güç dengesini göstermektedir.

(2) Enerji depolama kısıtlamaları

$$Q^t_S = Q^t_{S-} + \eta_S P^t_{S+} \Delta t - \frac{P^t_S \Delta t}{\eta_S} \quad (10)$$

$$0 \leq Q^t_S \leq \bar{Q}_S \quad (11)$$

$$\left| \frac{Q^t_S}{Q^t_{S-}} \right| \leq \beta \quad (12)$$

Eşitlik (10) SES'te depolanan enerjinin güncellenmesini göstermektedir, burada η_S +

sırasıyla şarj vedeşarj verimlilikleridir. Eşitlik (11), SES'te depolanan enerjinin kapasiteyi aşamayacağını gösterir. Eşitlik (12) her döngünün başında ve sonunda enerji depolama "sıfırlamasını" göstermektedir. Pratik nedenler göz önünde bulundurulduğunda küçük bir sapmanın kabul edilebilir olduğuna dikkat edin.

(3) Fiyat kısıtlamaları

$$0 < r^t_{-S2C} \leq r^t_{S2C} \leq \bar{r}^t_{S2C} \quad (13)$$

$$0 < r^t_{-C2S} \leq r^t_{C2S} \leq \bar{r}^t_{C2S} \quad (14)$$

Profesyonel tüketiciler ve SES arasındaki işlem fiyatları, ilgili alt ve üst sınırlar dahilinde sınırlandırılmıştır.

2.2.3. Profesyonel tüketicilerin amaç fonksiyonu

Stackelberg oyununda takipçi olarak, tüketici ittifakı SES'in sunduğu fiyata talep yanıtı gerçekleştirir ve elektrik giderini en aza indirmeyi amaçlar.

$$\min F_C = \min(F_{S2C} + F_{G2C} - F_{(C2S)}) \quad (15)$$

Burada $F_{(G2C)}$, tüketici ittifakının harici ana şebekeden konvansiyonel enerji satın almak için yaptığı harcamayı göstermektedir.

$$F_{G2C} = \sum_{i \in T} r^t_{G2C} P^t_{G2C} \Delta t \quad (16)$$

2.2.4. Profesyonel tüketicilerin kısıtlamaları

(1) Talep yanıtı kısıtlamaları

$$\sum_{i \in T} P^t_{iL} = P^t_{iL0} - \sum_{i \in T} P^t_{iL-} - P^t_{iL+} + P^t_{iL+} \quad (17)$$

$$0 \leq P^t_{iL-} \leq \bar{P}_{iL-} \quad (18)$$

$$0 \leq P^t_{iL+} \leq \bar{P}_{iL+} \quad (19)$$

$$P^t_{iL0} \leq P^t_{iL} \leq P^t_{iL-} \quad (20)$$

$$P^t_{iL0} \leq P^t_{iL} \leq P^t_{iL-} \quad (21)$$

Eşitlik (17) talep yanıtından sonra yükün güncellenmesini göstermektedir. Eşitlik (18), tüketici yükünün yalnızca kaydırılabileceğini ancak kaldırılamayacağını varsayar. Eşitlik (19)-(21) azaltılan yükün sınırlarını göstermektedir, sırasıyla artan ve nihai yük değerleri.

(2) Güç dengesisi kısıtlamaları

$$\left| P^t_{iL} - P^t_{iPV} \right| = 0 \quad (22)$$

Eşitlik (22), yük talebinin kendi FV üretimi ile karşılanamaması durumunda i üreticisinin diğer üreticilerden, SES'ten ve harici ana şebekeden elektrik satın alabileceğini ve fazla FV üretimi varsa diğer üreticilere ve SES'e elektrik satabileceğini göstermektedir.

$$\sum_{i \in T} (P^t_{(i) L} + P^t_{(i) S2C}) = \sum_{i \in T} (P^t_{iPV} + P^t_{(G2) (i)} + P^t_{(S2) (i)}) \quad (23)$$

Eşitlik (23) tüm tüketici ittifakı içindeki güç dengesini göstermektedir.

(3) RPS kota kısıtlamaları

$$\sum_{i \in T} \frac{(P^t_{iL} - P^t_{iL-}) \Delta t}{\sum_{i \in T} P^t_{iL} \Delta t} \geq \beta \quad \forall i \in T \quad (24)$$

Eşitlik (24), her bir üreticinin, tüketilen yenilenebilir enerji kaynaklarının minimum oranını belirleyen RPS kotasını yerine getirmesi gerektiğini göstermektedir. enerjisinin toplam enerji tüketimine oranı.

2.3. Alt katmanda işbirlikçi oyun

2.3.1. Katkı puanı

Stackelberg oyununda takipçi olarak, birden fazla tüketici SES tarafından sunulan fiyata ortaklaşa yanıt vermek ve toplam gideri en aza indirmek için bir işbirliği ittifakı oluşturur. Elektrik de ittifak içindeki tüketiciler arasında eşler arası (P2P) bir şekilde değiş tokuş edilir. Nash pazarlık teorisi [44] işbirlikçi bir oyunda birden fazla oyuncunun çıkarlarını iyi bir şekilde dengeleyebilir ve Nash dengesi bireysel rasyonaliteyi ve Pareto optimalitesini gerçekleştirebilir. Bununla birlikte, genel Nash pazarlığı bireysel katkı farkını göz ardı eder ve sadece eşit dağılım sonuçları [45,46,47]. Aksine, asimetrik Nash

pazarlık, bilgi veya statü asimetrisine göre pazarlıktaki oyuncuların farklı pazarlık yeteneklerini dikkate alır [48,49,50]. P2P enerji karşılıklılığı sırasında her bir tüketicinin ittifaka katkı puanını değerlendirmek için üstel fonksiyon tabanlı bir eşleme yaklaşımı kullanılır ve alt katman işbirlikçi oyun için asimetrik Nash pazarlık modeli oluşturulur.

P2P enerjisi sırasında i tüketicisinin toplam arz ve talebi

Bir döngüdeki karşılıklılık aşağıdaki gibidir:

$$q_i^+ = \sum_{t \in \mathbb{T}} \left(\sum_{j \in \mathbb{I}, j \neq i} P_{ij}^t \Delta t \right) \quad \forall i \in \mathbb{I} \quad (25)$$

$$q_i^- = \sum_{t \in \mathbb{T}} \left(\sum_{j \in \mathbb{I}, j \neq i} P_{ji}^t \Delta t \right) \quad \forall i \in \mathbb{I} \quad (26)$$

$Q^+ = \max_{i \in \mathbb{I}} \{q_i^+\}$ ve $Q^- = \max_{i \in \mathbb{I}} \{q_i^-\}$ olsun.

İttifaktaki i tüketicisi, P2P enerji karşılıklılığındaki performansına göre puanlanabilir.

$$\varphi_i = \exp\left(\frac{q_i^+}{Q^+}\right) - \exp\left(\frac{q_i^-}{Q^-}\right) \quad \forall i \in \mathbb{I} \quad (27)$$

2.3.2. Asimetrik Nash pazarlık modeli

Katkı puanı, P2P işlemlerine katılan çoklu üreticilerin asimetrik Nash pazarlık optimizasyon modelinde benimsenmiştir. Amaç, tüm üreticilerin masraflarını azaltmaktır.

$$\begin{cases} \max_{i \in \mathbb{I}} [F_{i(i)}^{(0)} - F_{i(i)}^{(Co)} - F_{i(i)}^{(P2P)}]^{(\varphi)_i} \\ \text{s.t.} \quad F_i = \sum_{j \in \mathbb{I}, j \neq i} \sum_{t \in \mathbb{T}} P_{ji}^t \Delta t \\ \sum_{i \in \mathbb{I}} \sum_{j \in \mathbb{I}, j \neq i} P_{ij}^t = \sum_{j \in \mathbb{I}} \sum_{i \in \mathbb{I}, i \neq j} P_{ji}^t \\ F_i^0 - F_{i,Co} - F_{i,P2P} \geq 0 \end{cases} \quad (28)$$

$$\begin{cases} \min \left\{ \sum_{i \in \mathbb{I}} \left[\varphi_i \ln \left(\frac{F_{i,Co} - F_i}{F_{i,Co} - F_i - F_{i,P2P}} \right) \right] + \sum_{j \in \mathbb{I}, j \neq i} \left[\lambda^{(i)}(r) - r^{(i)}(r) \right] + \sum_{j \in \mathbb{I}, j \neq i} \left[\frac{(\rho)_i}{\sum_{t \in \mathbb{T}} \left(\frac{r^{(i)}(r)}{(\rho)_i} \right)} \right] \right\} \\ \text{s.t.} \quad F_{i(i)}^{(0)} - F_{i(i)}^{(Co)} - F_{i(i)}^{(P2P)} \geq 0 \\ F_{i,P2P} = \sum_{j \in \mathbb{I}, j \neq i} \sum_{t \in \mathbb{T}} P_{ji}^t \Delta t \end{cases} \quad (32)$$

Burada F_i^0 , i tüketicisinin bağımsız işlem giderini göstermektedir.

e. işbirliği kırılma noktası. $F_{i(i)}^{(Co)}$, işbirliğinden sonra i tüketicisinin gideridir. $F_{i(i)}^{(P2P)}$, i tüketicisinin enerji alımındaki giderini temsil eder-

procity. r_{ij}^t i tüketicisinin enerji için ödemesi gereken fiyatı temsil eder karşılıklılık P_{ij}^t t zaman aralığında. Eşitlik (28) masrafı maksimize etmeyi amaçlar işbirliği yapmayanlara kıyasla tüketici ittifakının azaltılması. Logaritmik fonksiyonun monoton olarak artan konveks özelliği nedeniyle, Eşitlik (29) aşağıdaki minimizasyon problemine eşdeğerdir.

$$\min_{i \in \mathbb{I}} - \sum_{i \in \mathbb{I}} \ln \left[\frac{F_{i(i)}^{(0)} - F_{i(i)}^{(Co)} - F_{i(i)}^{(P2P)}}{F_{i(i)}^{(0)} - F_{i(i)}^{(Co)}} \right] \quad (29)$$

3. Çözüm metodolojisi

3.1. Üst katman probleminin çözümü

İlk olarak, SES (lider) fiyat dizisini $\{r^{(1)}(0)(1), r^{(1)}(0)(1)\}$ başlatır, S2C C2S

burada r , T boyutlu bir vektördür, $r = [r^1, \dots, r^T]$; tüketici ittifakı (takipçi), kısıtlı hedefi minimize ederek fiyata yanıt verir

fonksiyonunu (Eşitlik 17-24) kullanarak optimal işlem miktarını $\{P^{(1)}(0)(1)\}$ üretir, S2C C2S

$P^{(1)}(0)(1)$; SES işlem miktarını alır, kısıtlı amaç fonksiyonunu (Eşitlik 3-14)

maksimize ederek fiyatı yeniden optimize eder ve

fiyat $\{r^{(1)}(1)(1), r^{(1)}(1)(1)\}$; tüketici ittifakı sırayla S2C C2S

optimal işlem miktarı $\{P^{(1)}(1)(1), P^{(1)}(1)(1)\}$. Liderin stratejileri ve S2C C2S

takipçisi, oyundaki hiçbir oyuncu stratejisini değiştirerek kazancını iyileştiremiyorsa, Nash dengesine ulaşılan kadar yinelemeli olarak güncellenir.

$$\begin{cases} Y^* = \{r^*, P^*\}_{S2C, C2S} = \arg \max_{r, P} F_S(r_{S2C}, r_{C2S}, P^*, P^*)_{S2C, C2S} \\ Y_2^* = \{P_{S2C}^*, P_{C2S}^*\} = \arg \min_{P} F_C(r_{S2C}, r_{C2S}, P_{S2C}, P_{C2S}) \end{cases} \quad (30)$$

Önerilen Stackelberg oyun modeli iki seviyeli oyun modeline ait olduğundan

optimizasyon problemi, yukarıdaki hiyerarşik çerçeve, genetik algoritmanın kullanıldığı tek seviyeli bir optimizasyon sürecine dönüştürülebilir. ritmi, liderin optimizasyonu ile başa çıkmak için kullanılır.

YALMIP/ CPLEX araç kutusunu kullanan takipçi aşaması. Nash dengesi elde edilene kadar optimal çözümler sürekli olarak güncellenir.

3.2. Alt katman probleminin çözümü

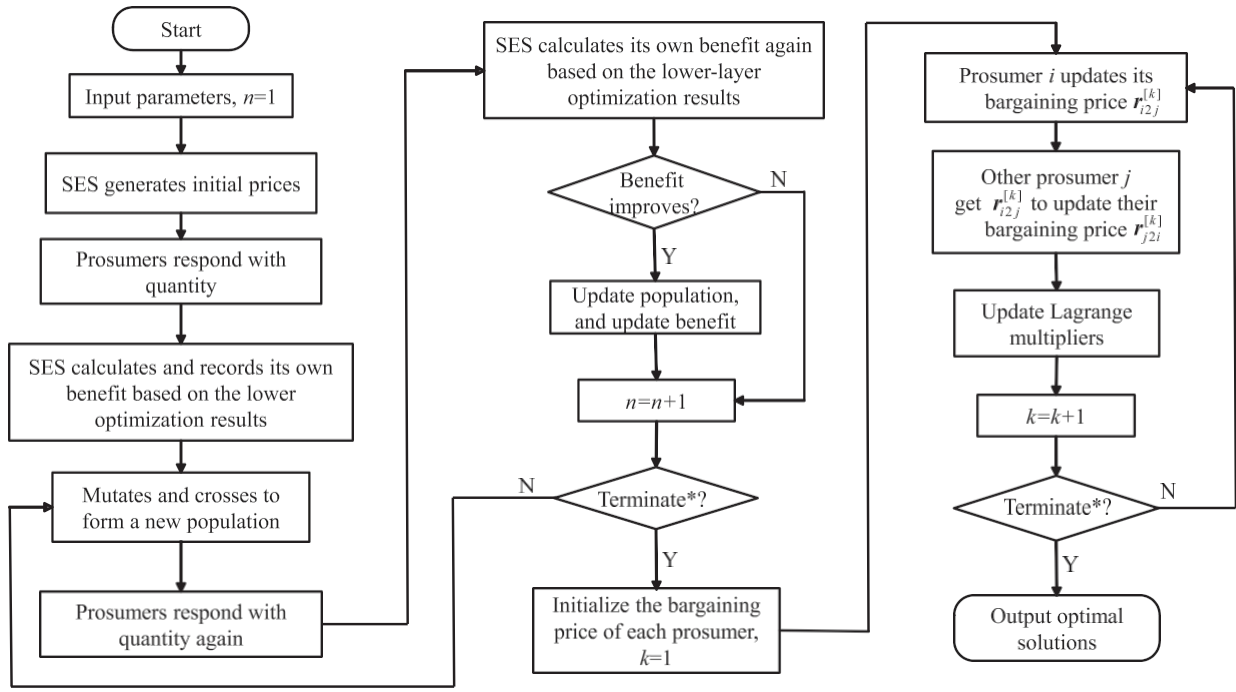
Üst Stackelberg oyununun optimal çözümüne dayanarak, alt katmanda asimetrik Nash pazarlık modeli aşağıdaki amaçlarla kurulur

gizliliğin korunması için ADMM tarafından çözülen profesyonel tüketicilerin işbirliği faydasını tahsis eder. Pazarlık fiyatı, i ve j tüketicileri arasındaki fiyat mutabakatı ile ayrıştırılabilir:

$$|r_{ij}^{(i)} - r_{ij}^{(j)}| \leq \varepsilon \quad (31)$$

burada $r_{ij}^{(i)}$ ve $r_{ij}^{(j)}$ i ve j tüketicilerinin aşağıdaki ürünler için teklif fiyatını temsil eder

$P_{i(i)}^{(Co)}$, (j) , sırasıyla. Ve prosumer i 'nin artırılmış Lagrangian fonksiyonu olarak ifade edilir:



*Terminate: Satisfy convergence condition or reach the maximum number of iterations.

Şekil 2. İki katmanlı İki katmanlı iç içe oyun modelinin akış şeması.

Burada λ_j ve ρ_j sırasıyla Lagrange çarpanı ve ceza faktörüdür.

Alt katman modelinin çözümü aşağıdaki gibi gösterilmiştir.

Girdiler: Üst katman probleminin çözümleri. Başlatma.

k için = 1 ile K do.

(1) Dağıtılmış hesaplama.

Her bir i tüketicisi stratejisini r^{k+1}_{i2j} ile günceller:

$$r^{k+1}_{i2j} = \arg \min_{r_{i2j}} L_{ij}(\lambda_j, r_{i2j}) = \arg \min_{r_{i2j}} \left(\lambda_j \left(r_{i2j} - r^{k+1}_{j2i} \right) + \rho_j \left(r_{i2j} - r^{k+1}_{j2i} \right)^2 \right)$$

Diğer üreticiler j stratejilerini r^{k+1}_{j2i} ile güncellemek için r^{k+1}_{j2i} alırlar:

$$r^{k+1}_{j2i} = \arg \min_{r_{j2i}} L_{ji}(\lambda_i, r_{j2i}) = \arg \min_{r_{j2i}} \left(\lambda_i \left(r_{j2i} - r^{k+1}_{i2j} \right) + \rho_i \left(r_{j2i} - r^{k+1}_{i2j} \right)^2 \right)$$

(2) Lagrange çarpanlarını şu şekilde güncelleyin:

$$\lambda_j^{k+1} = (\lambda_j^{[k]} + (\rho_j) (r^{k+1}_{i2j} - r^{k+1}_{j2i}))$$

(3) $k \leftarrow k + 1$, ve (1)'e geri dönün. için sonlandırın.

Önerilen iç içe oyun modelinin akış şeması Şekil 2'de gösterilmektedir.

4. Sayısal çalışmalar

4.1. Temel veriler

Bu araştırma, Şekil 3'te gösterildiği gibi, Güneybatı Çin'deki Guiyang'a yaklaşık 27 km uzaklıktaki Hongfeng Gölü yakınında bir yenilenebilir enerji aktif dağıtım ağı tanıtım projesini incelemektedir. İncelenen bu vaka, bir SES ve aktif bir enerji topluluğu oluşturan üç prosumer içermektedir. Dış varlıklar arasında ana şebeke, bir hidroelektrik santrali ve bir rüzgar çiftliği bulunmaktadır. Gerçekten, üç tüketici sırasıyla apartmanlar, kantinler ve restoranlar ve deneysel eğitim fabrikalarıdır. Her bir tüketici merkezi bir enerji yönetim sistemi, akıllı sayaçlar, çift yönlü iletişim altyapısı, geleneksel elektrikli cihazlar, akıllı elektrikli cihazlar, elektrikli araç şarj istasyonları ve PV üretim tesisleri ile donatılmıştır.

Harici ana şebeke ve hidroelektrik santrali sonsuz güç kaynakları olarak varsayılmıştır. Üç üreticinin ve rüzgar santralinin 24 saatlik güç profili tahmini Şekil 4'te gösterilmiştir. Sunucuların ve SES'in ilgili parametreleri Tablo 1'de gösterilmektedir. Simülasyon ortamı şöyledir,

Intel (R) Core (TM) i7-7700 @ 3.6 GHz, 8 GB DDR3 RAM, MATLAB-2018a, Cplex12.8, Mosek10.0. Ticari gizliliği korumak ve bilimsel titizliği sürdürmek için bazı verilerin değiştirildiğine dikkat edin.

4.2. Sonuç analizi

4.2.1. İç içe oyun modelinin ekonomik avantajları

Önerilen yöntemin etkinliğini ve avantajlarını doğrulamayı amaçlayan modeline göre, bu alt bölümde dört farklı ticaret modu incelenmektedir takip eder:

- Mod 1: Ne bir Stackelberg oyunu ne de bir işbirliği oyunu vardır,

yani, bu toplulukta bir SES mevcut değildir; üreticiler hidroelektrik santralinden ve rüzgar çiftliğinden doğrudan yenilenebilir enerji satın almaktadır ve üreticiler arasında enerji mütekabiliyeti yoktur.

- Mod 2: Sadece işbirliği oyunu vardır, yani bu toplulukta bir SES yoktur; üreticiler bir işbirliği ittifakı oluşturur, hidroelektrik santralinden ve rüzgar çiftliğinden yenilenebilir enerji satın alır ve ittifak içinde enerji alışverişi yapar.

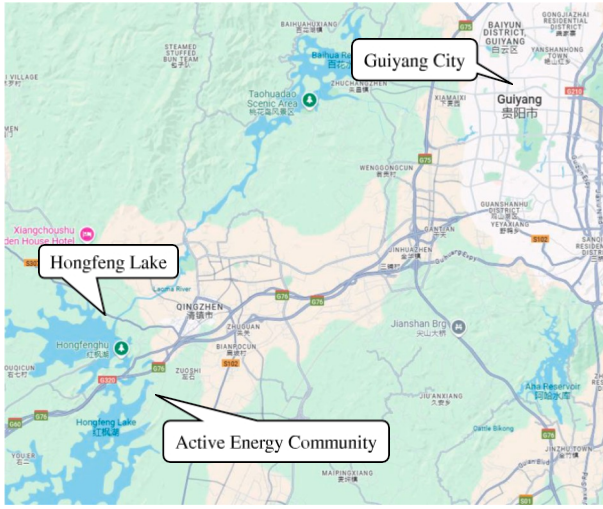
- Mod 3: Sadece Stackelberg oyunu vardır, yani bu toplulukta bir SES vardır; her bir tüketici bağımsız olarak SES ile yenilenebilir enerji ticareti yapar ve tüketiciler arasında enerji karşılıklılığı yoktur.

- Mod 4: Hem Stackelberg oyunu hem de işbirlikçi oyun vardır, yani bu toplulukta bir SES ve tüketici ittifakı vardır; ve etkileşim bu makalede önerilen iki katmanlı iç içe oyun modeli ile tanımlanabilir.

Tablo 2'de dört ticaret modu altında profesyonel tüketicilerin giderleri ve SES'in gelirleri listelenmektedir. Tüketici ittifakının toplam giderinin genel Nash pazarlık modeli kullanılarak dağıtıldığı varsayılmaktadır.

1) Tüketicilerin işbirliğinin önemi

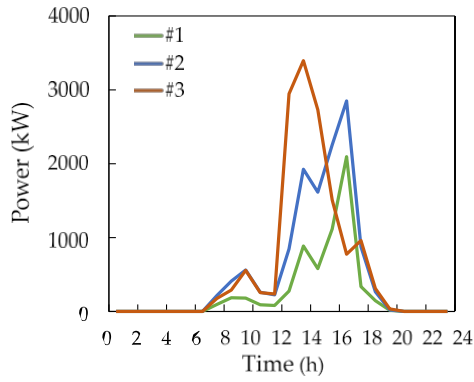
Tüketici işbirliğinin önemini göstermek için Mod 2 kapsamındaki tüketici harcamalarını Mod 1 kapsamındakilerle karşılaştırıyoruz. As



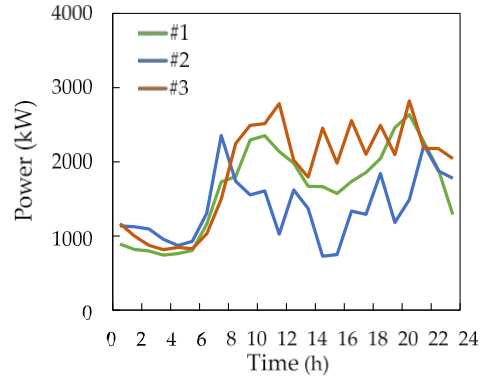
(a) Geographical location.

(b) Satellite image.

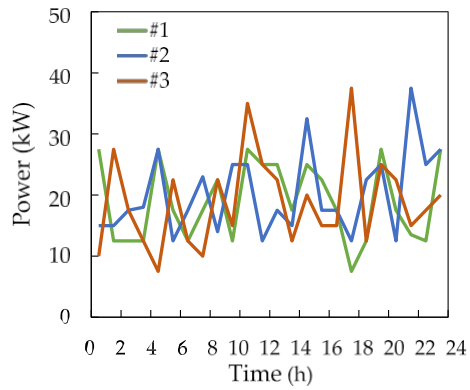
Şekil 3. Google Haritalar üzerinde incelenen aktif enerji topluluğu örneği.



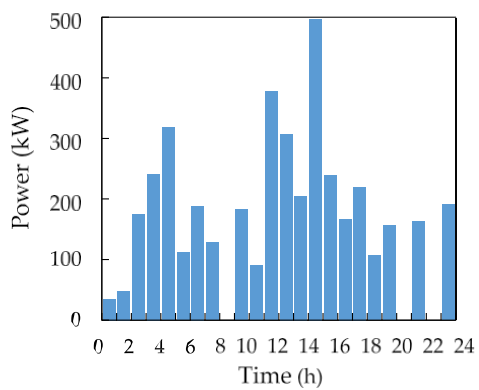
(a) PV generation of prosumers.



(b) Load demand of prosumers.



(c) Reducible load demand of prosumers.



(d) Output of wind farm.

Şekil 4. Profesyonel tüketicilerin ve rüzgar çiftliğinin öngörülen güç profilleri.

Tablo 3'te gösterildiği üzere, her bir tüketicinin bireysel gideri ve tüketicilerin toplam gideri %7,08, %9,94, %7,33 ve %7,93 oranında azalmaktadır. sırasıyla %. Bunun nedeni, üreticiler arasındaki iç enerji karşılıklılığının yenilenebilir enerjinin esnekliğini önemli ölçüde artırmasıdır.

Potansiyel tamamlayıcılık nedeniyle tüketim ve ana şebeke, hidroelektrik santrali ve rüzgar çiftliği gibi harici güç kaynaklarına bağımlılığı azalır.

Tablo 1

Simülasyon parametreleri.

Parametreler	Değer	Parametreler	Değer
ρ_1	0.78	r_w (CNY/kWh)	0.699
ρ_2	0.82	$r_H^{(t)}$ (CNY/kWh)	0,772 (Tepe), 0,542 (Düz), 0,226 (Vadi)*
ρ_3	0.80	r_G (CNY/kWh)	0.08
$\bar{Q}^{(1)}$ (kWh)	3250	$\bar{r}_{SC}^t$ (CNY/kWh)	r_H^t
$\bar{Q}$ (kWh)	12,000	$\bar{r}_{SC}^t$ (CNY/kWh)	0,75- $r_H^{(t)}$
$\bar{P}_S$ (kW)	8000	$\bar{r}_{CS}^t$ (CNY/kWh)	0.072
$\bar{P}_{H2S}$ (kW)	10,000	$\bar{r}_{CS}^t$ (CNY/kWh)	0.016
$\bar{P}_{W2S}$ (kW)	10,000	$\eta_S + \eta_S -$	0.98
$\bar{P}_X$ (kW)	15,000	δ	0.1

*. Vadi dönemleri: 0:00~ 3:00; 14:00~ 16:00; 21:00~ 24:00; Düz dönemler: 3:00 ~ 14:00; 16:00~ 18:00; Yoğun dönemler: 18:00~ 21:00.

Tablo 2

Farklı ticaret modları altında karşılaştırmalar.

Mod	Profesyonel tüketici masrafı 1 (CNY)	Profesyonel tüketici masrafı 2 (CNY)	Profesyonel tüketici masrafı 3 (CNY)	Toplam gider	SES'in Gelirleri
1	11,140	7930.2	10,756	prosumers 29829.2	N/A
2	10351.4	7141.8	9967.6	27460.8	N/A
3	10514.9	7823.1	10240.2	28578.2	7551.4
4	9994.5	6799.6	9628.6	26422.7	6676.1

2) SES'in katılımının önemi

SES'in katılımının önemini göstermek için Mod 3 kapsamındaki tüketici giderlerini Mod 1 kapsamındakilerle karşılaştırıyoruz. [Tablo 3](#)'te gösterildiği üzere, her bir tüketicinin bireysel gideri ve tüketicilerin toplam gideri sırasıyla %5,61, %1,36, %4,81 ve %4,19 oranında azalmaktadır. Ayrıca, SES enerji komisyoncusu rolünü oynayarak 7551,4 CNY gelir elde edebilir. Sonuç olarak, her iki taraf için de SES'in lider ve üreticilerin takipçi olduğu Stackelberg oyununa katılmak faydalıdır.

3) İki katmanlı iç içe geçmiş oyunun avantajları.

Tüketicilerin işbirliğine ek olarak üst katman etkileşiminden kaynaklanan iyileşmeyi göstermek için Mod 4 kapsamındaki üreticilerin giderlerini Mod 2 kapsamındakilerle karşılaştırıyoruz. Mod 2 ile karşılaştırıldığında, Mod 4 her bir tüketicinin bireysel giderini ve tüketicilerin toplam giderini sırasıyla %3,45, %4,79, %3,41 ve %3,78 oranında azaltmaktadır. Mod 4 ayrıca SES'e 6676.1 CNY gelir getirebilir.

SES ve tüketici ittifakı arasındaki işlemin yanı sıra alt katman işbirliği oyunundan kaynaklanan iyileşmeyi göstermek için Mod 4 kapsamındaki tüketicilerin giderlerini ve SES'in gelirini Mod 3 kapsamındakilerle karşılaştırıyoruz. Mod 3 ile karşılaştırıldığında, Mod 4 her bir tüketicinin bireysel giderini ve tüketicilerin toplam giderini sırasıyla %4,95, %13,09 ve %5,97 ve %7,54 oranında azaltmaktadır. Mod 4 ayrıca SES'in gelirini de %11,59 oranında azaltır. Piyasa oyuncularının çıkarlarını daha iyi dengeleyebildiği ve üreticilerin işbirliğine katılımını teşvik edebildiği için, önerilen iki katmanlı iç içe oyun modeli, RPS kapsamındaki aktif enerji topluluğunun ekonomik ve düşük karbonlu çalışması için elverişlidir.

4.2.2. Tahmin değişikliklerinin etkisi

Maksimum varyasyonun $\pm$ %5 olduğunu varsayarsak, üç tanesini araştırıyoruz

Tablo 3

Tahmini kaynak ve yükün aynı yöndeki değişiminin etkisi.

Mod	Giderleri prosumer 1 (CNY)	Tüketici 2'nin gideri (CNY)	Tüketici masrafı 3 (CNY)	Profesyonel tüketicilerin toplam gideri (CNY)	SES'in Geliri (CNY)
1	11,862	7825	11541.1	31228.1	N/A
2	11041.7	6999.6	10722.5	28763.8	N/A
3	11,226	7767	11,016	30,009	7929.7
4	10671.2	6648	10,385	27704.2	7002

Tablo 4

Tahmini kaynak ve yükün ters yöndeki değişiminin etkisi.

Mod	Giderleri prosumer 1 (CNY)	Giderleri prosumer 2 (CNY)	Giderleri prosumer 3 (CNY)	Toplam masrafı prosumers (CNY)	Gelir SES'in (CNY)
1	11779.7004	7793	11506.2	31078.9004	N/A
2	10989.5026	6969.9	10682.1974	28641.6	N/A
3	11,147	7718.7	10941.3	29,807	7946.8
4	10615.3979	6612.8	10330.6021	27558.8	7023.2

Tablo 5

Tahmini kaynak ve yükün rastgele değişiminin etkisi.

Mod	Profesyonel tüketici masrafları 1 (CNY)	Profesyonel tüketici masrafları 2 (CNY)	Profesyonel tüketici masrafı 3 (CNY)	Profesyonel tüketicilerin toplam gideri (CNY)	SES'in Gelirleri (CNY)
1	11625.2	7669.9	11328.9	30,624	N/A
2	10852.4	6883.7	10548.79591	28284.89591	N/A
3	10981.1	7597.4	10,774	29352.5	7756.2
4	10,346	6512	10,173	27,031	6857

Kaynak ve yükteki tahmin profillerinin senaryoları aşağıdaki gibidir:

1. Aynı yönlü varyasyon: kaynak ve yük profillerinin her ikisi de her zaman aralığında %5 artar;
2. Ters yönlü varyasyon: kaynak ve yük profilleri %5 artar ve her bir zaman aralığında sırasıyla %5 azalır;
3. Rastgele değişim: kaynak ve yük profillerinin her ikisi de her zaman aralığında $\pm$ 5 % içinde rastgele değişir.

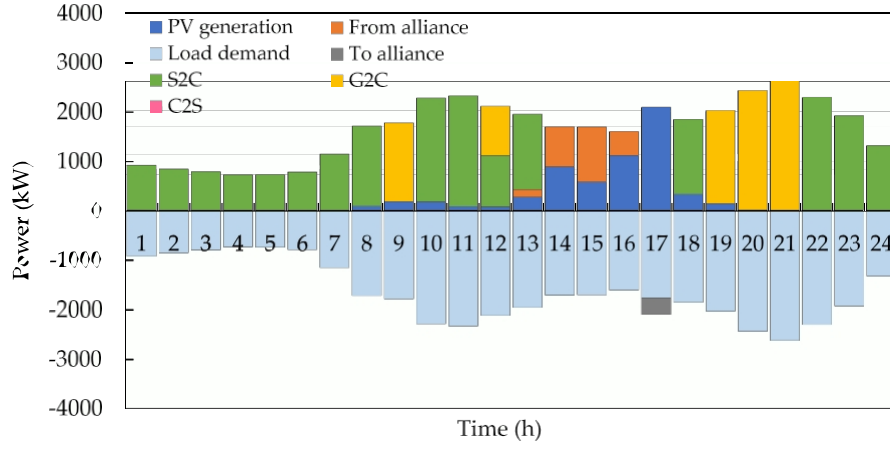
Bölüm 4.2.1'de bahsedilen dört ticaret modu altında sayısal deneyler gerçekleştirilmiş, tahmin profili değişiminin üç senaryosunun sonuçları [Tablo 3](#), [Tablo 4](#) ve [Tablo 5](#)'te gösterilmiştir.

Tahmin varyasyonunun üç senaryosunun tümünde, önerilen model diğer üç ticaret modundan daha iyi performans göstermektedir. Önerilen modelin çeşitli senaryolardaki sağlamlığı ve avantajları gösterilmiştir.

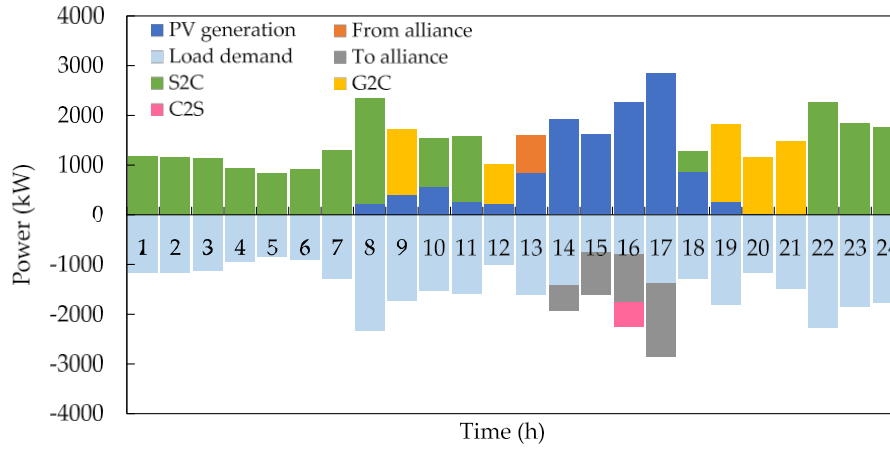
4.2.3. Bireysel tüketicilerin güç dengesi

[Şekil 5](#)'te her bir tüketicinin optimize edilmiş güç dengesi gösterilmektedir. Bir üretici için, pozitif çubuklar kendi PV üretimini ve SES'ten, diğer üreticilerden ve harici ana şebekeden alınan enerjiyi göstermektedir; ve negatif çubuklar kendi yük talebini ve SES'e ve diğer üreticilere sunulan enerjiyi göstermektedir. [Şekil 5.](#), üreticiler arasındaki enerji karşılıklılığını ayrıntılı olarak göstermektedir

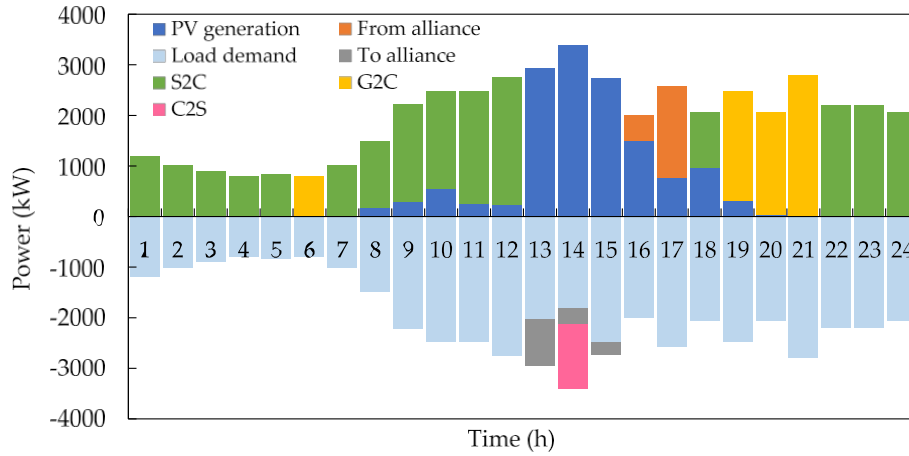
[Şekil 5.](#) (a)-(c)'den pro- sumerların üç genel davranışını çıkarabiliriz İlk olarak, çoğu zaman diliminde üreticiler arasında enerji karşılıklılığının olmadığı görülmektedir. PV üretimi talebi neredeyse hiç karşılayamadığından, üreticiler ittifak içinde enerji alışverişini yapmak yerine SES'ten veya harici ana şebekeden enerji satın almak zorunda kalmaktadır. İkinci olarak, konvansiyonel enerji tüketimi, arz yetersizliği ve yenilenebilir enerjinin en yüksek fiyatı nedeniyle yoğunlukla akşam saatlerinde, yani yoğunlukla 18:00-21:00 saatleri arasında gerçekleşmektedir. Rasyonel piyasa oyuncuları olarak profesyonel tüketiciler, yenilenebilir enerjiyi daha düşük fiyatlardan tüketmeyi tercih etmektedir.



(a) Prosumer 1.

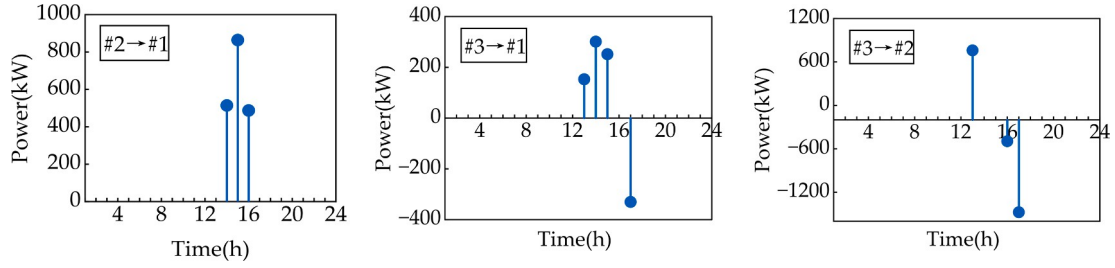


(b) Prosumer 2.

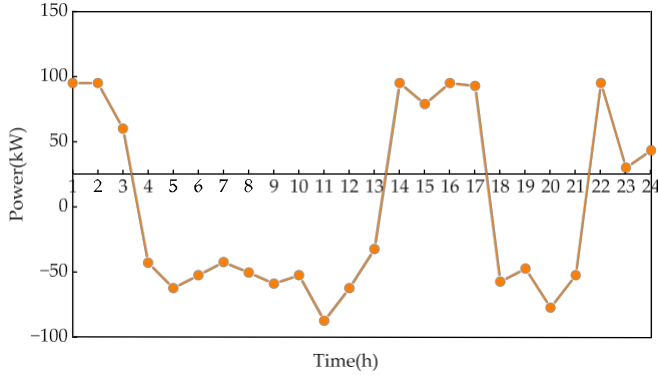


(c) Prosumer 3.

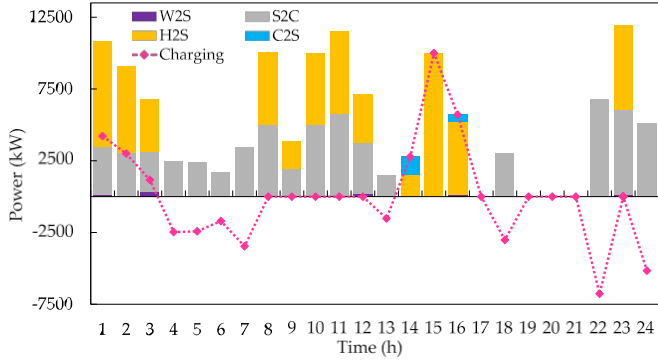
Şekil 5. Profesyonel tüketicilerin optimizasyon sonuçları.



Şekil 6. Profesyonel tüketiciler arasında enerji karşılıklılığı.



Şekil 7. İttifakın optimal ve orijinal yükü arasındaki değişimler.



Şekil 8. SES'in enerji dağıtımı.

gider ve RPS kotasını tamamlamak. Üçüncü olarak, ittifak içindeki enerji karşılıklılığının esas olarak 12:00-17:00 saatleri arasında gerçekleştiği gösterilmiştir. Arz fazlası ve arz eksikliği olan üreticiler enerji karşılıklılığı yoluyla işbirliği yapmaktadır. Ayrıca, ittifaktaki fazla enerji daha fazla kar için SES'e satılabilir. Bu tamamlayıcılık, kooperatif ittifakı oluşturmanın gerekliliğini ve önemini doğrulamaktadır.

Buna ek olarak, Şekil 6' dan her bir tüketicinin farklı miktarlarda yenilenebilir enerji verdiğini ve aldığını görebiliriz. Bu katkı farkını bir sonraki allo- cation bölümünde daha ayrıntılı olarak ele alacağız. Optimize edilmiş yükün orijinal yüke göre değişimleri Şekil 7'de gösterilmektedir. Gündüz saatlerindeki artışı, gece en yüksek fiyat dönemlerindeki düşüşü ve sabit fiyat dönemlerindeki hafif dalgalanmayı gözlemleyebiliriz. Tüketici ittifakının, SES tarafından sunulan fiyata talep yanıtı vererek RPS görevinden ve elektrik giderinden ödün verdiği gösterilmiştir.

4.2.4. SES'in şarj ve deşarjı

Şekil 8'de gösterildiği gibi, SES ile tüketici ittifakı arasında tüm gün boyunca, yani 0:00-16:00, 17:00-18:00 ve 21:00-24:00 saatleri arasında sık sık elektrik etkileşimi olmaktadır. SES'in ücretlendirme yaptığı görülmektedir.

0:00-3:00 ve 13:00-16:00 saatleri arasında, sırasıyla vadi fiyatındaki hidroelektrik enerjiden ve üreticilerin PV üretim fazlasından faydalanarak. Ayrıca SES'in 3:00-7:00, 12:00-13:00, 17:00-18:00, 20:00-21:00 ve 23:00-24:00 saatleri arasında deşarj olduğu görülmektedir.

nispeten düşük fiyatlar sunar, çünkü üreticiler aynı anda hem yük talebini karşılamak hem de RPS kotasını tamamlamak için SES'ten ucuz yenilenebilir enerji satın alma eğilimindedir.

Şekil 9, SES ve tüketici ittifakı arasındaki işlem fiyatını göstermektedir. SES, hem satış hem de satın alma durumlarında tüketicilere uygun fiyatlar sunar ve Stackelberg oyunundaki optimize edilmiş fiyat, SES'in çıkarlarıyla uyumlu olan kıyaslama fiyatının üst ve alt sınırlarıyla sınırlıdır. Pazarlık alanı genişse, SES, toplam geliri artırmak için tüketici ittifakını satın alma miktarını artırmaya teşvik etmek için daha düşük fiyatlar sunabilir. SES'in optimum fiyatının esas olarak tüketici ittifakının talebini karşıladığı bu işleme katılmak hem tüketiciler hem de SES için faydalıdır. Buna karşılık, SES de fiyat farkından kâr edebilir.

4.2.5. İttifak içinde gider tahsisi

İşbirliği oyununda, tüm ittifakın toplam giderini birden fazla üreticiye dağıtmak önemlidir. Bu amacı gerçekleştirmek için genel Nash pazarlığı benimsenmiştir. Ancak bu alt bölüm, üreticilerin katkı puanlarını dikkate alır ve daha mantıklı bir gider tahsisi uygulamak için asimetrik Nash pazarlığını uygular.

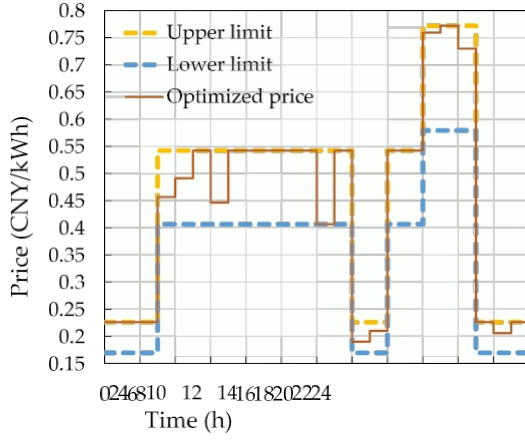
Gizliliğin korunması adına, ADMM doğal dağıtık özellikleri ve yüksek hesaplama verimliliği nedeniyle çözüm algoritması olarak benimsenmiştir [51]. Böylece, profesyonel tüketicilerin ekipman parametrelerini ve karar kısıtlamalarını duyurması gerekmez.

Şekil 10'da gösterildiği gibi, genel ve Asimetrik Nash pazarlık modelleri sırasıyla 81 ve 45 iterasyonda yakınsamaktadır. Ayrıca, hesaplama süresi sırasıyla 65 ve 43 s'dir.

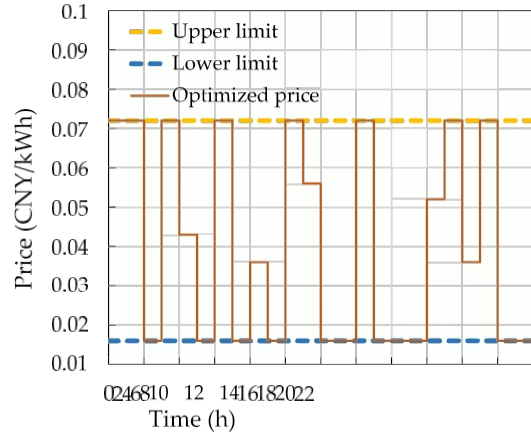
Şekil 11'de gösterildiği gibi, pazarlık genellikle üreticilerin tamamlayıcı enerjiye sahip olduğu saatlerde, yani 11:00-17:00 arasında gerçekleşmektedir. Pazarlık fiyatının her zaman SES tarafından sunulan alış ve satış fiyatı ile sınırlı olduğuna dikkat edin. Alt katmandaki işbirliği işlem moduna dayanarak, her bir tüketici genel ittifak için bireysel çıkarlarını feda etmeden bağımsız olarak teklif verebilir, her bir tüketicinin bireysel çıkarları garanti edilebilir. Ayrıca SES'e olan bağımlılıklarını azaltır ve pazarlık önceliğini artırır ki bu da enerji takası ile yenilenebilir enerji gelişimini teşvik etmenin birincil amacı ile tamamen tutarlıdır.

Tablo 6'da listelendiği gibi, genel Nash pazarlığı toplam gideri üç üreticiye sırasıyla 9994,5 CNY, 6799,6 CNY ve 9628,6 CNY olarak tahsis etmektedir. Genel Nash pazarlığı, ittifakta enerji karşılıklılığı sırasında üreticilerin gider tasarrufuna katkı puanlarını dikkate almadığından, üreticilerin gider tasarruf miktarları neredeyse aynıdır.

Aksine, asimetrik Nash pazarlığı her bir üreticinin katkı puanını dikkate alır. Tablo 7'de listelendiği gibi, üç pro-sumer oldukça farklı katkı faktörlerine sahiptir. Prosumer 2 ve Pro-sumer 1, işbirliği oyununun enerji karşılıklılığında sırasıyla en yüksek ve en düşük katkı puanlarına sahiptir. Ve gider tasarrufu

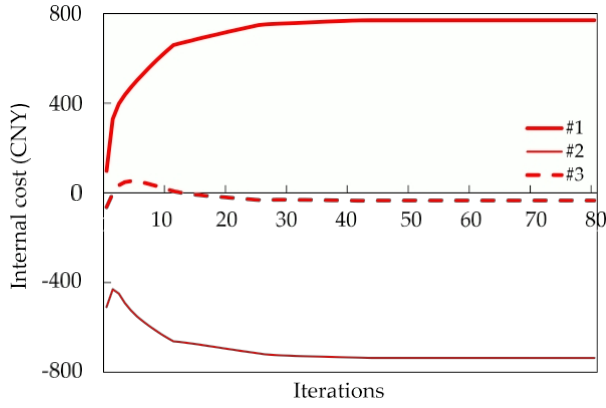


(a) S2C price.

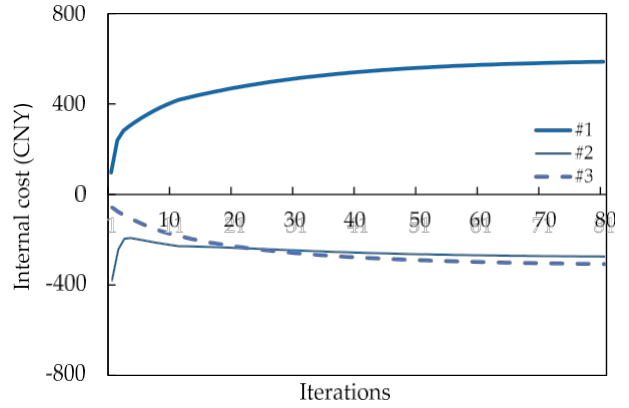


(b) C2S price.

Şekil 9. SES ve tüketici ittifakı arasındaki işlem fiyatı.

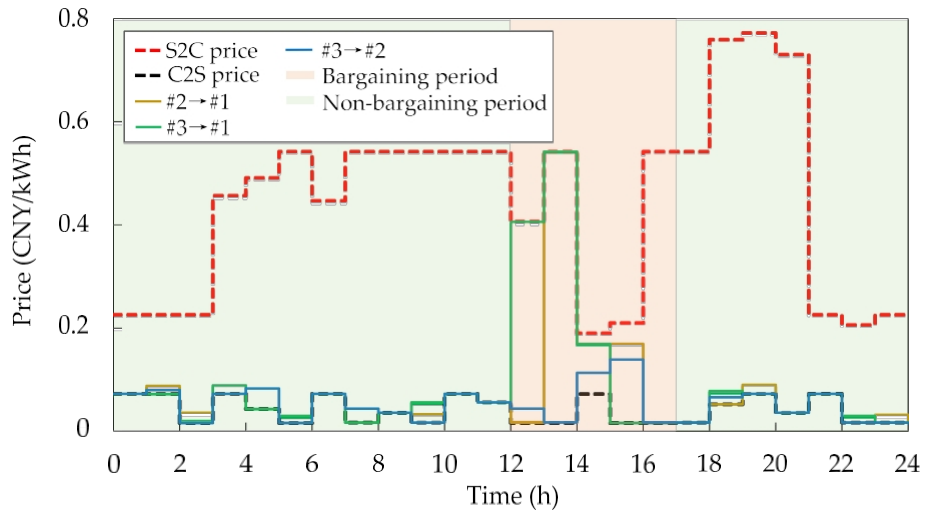


(a) Asymmetric Nash bargaining.



(b) General Nash bargaining.

Şekil 10. Pazarlığın algoritma yakınsaması.



Şekil 11. Profesyonel tüketiciler arasında asimetrik Nash pazarlık fiyatı.

Tablo 6

Genel Nash pazarlığına dayalı gider dağıtım planı.

Prosumer	Yenilenebilir enerji ittifak (kWh)	Katkı puanı	Pazarlık masrafı (CNY)	Toplam gider (CNY)	Gider tasarrufu miktar (CNY)
#1	2239.6	N/A	586.8	9994.5	1145.5
#2	-3077.1	N/A	-276.8	6799.6	1130.6
#3	837.4	N/A	-309.9	9628.6	1127.4

Tablo 7

Asimetrik Nash pazarlığına dayalı gider tahsis şeması.

Prosumer	Yenilenebilir enerji ittifak (kWh)	Katkı puanı	Pazarlık masrafı (CNY)	Toplam gider (CNY)	Gider tasarrufu miktar (CNY)
#1	2239.6	0.7221	770.1	10177.7	962.3
#2	-3077.1	1.9741	-736.2	6340.2	1590.1
#3	837.4	1.0564	-33.9	9904.7	851.3

miktari sırasıyla 962.3 CNY, 1590.1 CNY ve 851.3 CNY'dir. İşbirliğinin katkısı ne kadar fazlaysa, yeniden dağıtımda o kadar az fatura ödenmesi gerektiği doğrulanmıştır, yani prosumer 2, asimetrik Nash pazarlığının, bireylerin çıkarlarını göz önünde bulundurarak işbirliğine dayalı katkıya dayalı daha rasyonel dağıtım sonuçları elde edebileceğini göstermektedir, bu da katılımcıları refahı artırmak için katkıda bulunmaya motive etmek için "daha fazla acı, daha fazla kazanç" ı teşvik etmektedir. Ayrıca, bölüm 4.2.2'de 2 bahsedilen mod 1, mod ve mod 3 ile karşılaştırıldığında, asimetrik Nash pazarlığı dağıtımına dayalı gider sonuçlarının tüm katılımcılar için kabul edilebilir olduğu, RPS kapsamında en düşük elektrik giderinin profesyonel tüketicilere ait olduğu ve SES'in gelirinin uygun olduğu görülebilir. Bu da önerilen iki katmanlı hibrit modelin etkinliğini doğrulanmıştır.

5. Sonuç

Bu makale, Stackelberg oyunu ve işbirlikçi oyunu birleştiren iki katmanlı iç içe bir oyun modeli önererek RPS kapsamında yenilenebilir enerji tüketimi sorununu ele almaktadır. Gider tahsisi ve gizlilik koruması için sırasıyla asimetrik Nash bargai- ning ve ADMM uygulanmıştır. Önerilen modelin fizibilitesi ve etkinliği gerçekçi vaka simülasyonu ve karşılaştırmalı analizlerle doğrulanmıştır.

Ek A. ADMM algoritmasının çalışma prensibi

Bir optimizasyon problemi için:

$$\begin{aligned} & \min_{x,z} f(x) + g(z) \\ \text{s.t.} \quad & Ax + Bz = c \end{aligned} \quad (A1)$$

Burada $x \in \mathbb{R}^n$ ve $z \in \mathbb{R}^m$ karar değişkenlerinin vektörleridir; $A \in \mathbb{R}^{p \times n}$, $B \in \mathbb{R}^{p \times m}$ ve $c \in \mathbb{R}^p$ katsayı matrisleri/vektörleridir. Yukarıdaki formülün artırılmış Lagrange fonksiyonu şu şekilde ifade edilebilir:

$$L(x, y, z) = f(x) + g(z) + y^T(Ax + Bz - c) + \frac{\rho}{2} \|Ax + Bz - c\|^2 \quad (A2)$$

Burada $y \in \mathbb{R}^p$ Lagrange çarpanı, ρ ise ceza faktörüdür. ADMM'nin iteratif optimizasyon süreci aşağıdaki gibidir:

$$x^{(l+1)} = \argmin_x L(x, z^{(l)}, y^{(l)}) \quad (A3)$$

$$z^{[k+1]} = \argmin_z L(x^{[l+1]}, z, y^{(l)}) \quad (A4)$$

$$y^{[k+1]} = y^{[k]} + \rho(Ax^{[l+1]} + Bz^{[k+1]} - c) \quad (A5)$$

ADMM algoritması, diğer değişkenleri sabitleyerek ve her seferinde sadece bir değişkeni güncelleyerek orijinal problemi çözer ve iterasyon durdurma koşulu sağlanana kadar iteratif hesaplama yapar.

analizi. Temel sonuçlar aşağıdaki gibi çıkarılabilir:

- (1) Etkili maliyet azaltma ve kâr artırma. Üst katman Stackelberg oyunu, SES ve profesyonelliğin karşılıklı etkisini yakalar. toplayıcıların kararları. Fiyatlandırma stratejilerini optimize ederek, önerilen modeli, üreticiler için elektrik giderlerini etkili bir şekilde azaltır ve RPS koşulları altında SES kârını artırır. Bu yaklaşım, çeşitli piyasa katılımcılarının çıkarlarıyla iyi bir uyum içindedir.
- (2) Adil gider tahsisi. Alt katman işbirliği oyunundaki asimetrik Nash pazarlığı, her katılımcının enerji karşılıklılığına bireysel katkısını dikkate alır ve ticaret giderini buna göre tahsis eder. Bu mekanizma yalnızca tüm üreticiler için toplam elektrik giderini azaltmakla kalmaz, aynı zamanda

adil ve makul olmasını sağlayarak yüksek katılım coşkusu gider tahsisi.

- (3) Sağlam ve uygulanabilir çerçeve. Önerilen iki katmanlı iç içe oyun modeli, SES ve birden fazla üretici arasındaki karmaşık etkileşimleri modellemek için kapsamlı ve sağlam bir çerçeve sunmaktadır. Sağlamlığı ve uyarlanabilirliği, onu gelecekte hem bilimsel araştırmalar hem de pratik uygulamalar için değerli bir referans haline getirmektedir.

CRediT yazarlık katkı beyanı

Yaxin Tan: Yazım - orijinal taslak, Görselleştirme, Doğrulama, Yazılım, Metodoloji, Kavramsallaştırma. **Weisheng Xu:** Süpervizyon, Finansman temini. **Zhiyu Xu:** Proje yönetimi, Finansman temini, Biçimsel analiz. **Ruining Tong:** Yazılım, Kaynaklar, Araştırma. **Yuanbo Zhang:** Görselleştirme, Yazılım, Veri küratörlüğü.

Rekabetçi çıkar beyanı

Yazarlar, bu makalede rapor edilen çalışmayı etkileyebilecek bilinen herhangi bir rakip finansal çıkarları veya kişisel ilişkileri olmadığını beyan etmektedir.

Teşekkür

Bu araştırma, Çin Ulusal Doğa Bilimleri Vakfı (No. 61973238 ve No. 61773292) ve Çin Sanayi-Üniversite-Araştırma İnovasyon Vakfı (2023IT071) tarafından finansal olarak desteklenmiştir.

Veri kullanılabilirliği

Veriler talep üzerine kullanıma sunulacaktır.

Referanslar

- [1] Qiu W, Wang M, Lin Z, Yang L, Wang L. ortak kapsamlı değerlendirmesi. Karbon emisyonu zirvesi ve karbon nötrlüğü Electr Power Autom Equip 2021;41 hedefleri altında yeni enerji konaklama senaryosuna yönelik enerji depolamanın (10):244-55.
- [2] Hu J, Li P, Lin S, Ding J. Akıllı bina kümeleri için enerji paylaşım yöntemi. kullanım zamanı fiyatlarındaki farklılıkları dikkate alan ve efendi-köle oyununa dayanan Power Syst Technol 2021;45(12):4738-48.
- [3] Fleischhacker A, Auer H, Lettner G, Botterud A. güneş PV ve enerji paylaşımive Apartmanlarda depolama : kaynak tahsisi fiyatlandırma. IEEE Trans Smart Grid 2019;10(4):3963-73.
- [4] Cao W. inşasında yerel yönetimin tüketim yükümlülüğüYenilenebilir enerji kota sisteminin . Local Legis J 2019;4(2):91-102.
- [5] Wang T, Gong Y, Jiang C. yenilenebilir enerji payının teşvik edilmesi üzerine bir inceleme. Güç sisteminde yeşil ticaret mekanizmaları ileRenew Sust Energ Rev 2014;40:923-9.
- [6] Zhao X, Feng T, Cui L, Feng X. öndeki engeller ve kurumsal düzenlemelerYenilenebilir portföy standardının uygulanmasını : Çin perspektifi. Renew Sust Energ Rev 2014;30:371-80.
- [7] Sun Y. iki optimal yüzde gereksinimi ve refah karşılaştırmalarıOrtak ticarete konu yeşil sertifika sisteminde sahip ülkeli bir elektrik piyasasında . Econ Model 2016;55:322-7.
- [8] Joshi J. Yenilenebilir portföy standartları yenilenebilir enerji kapasitesini artırır mı? Amerika Birleşik Devletleri'nden kanıtlar. J Environ Manage 2021;287:112261.
- [9] Wiser R, Porter K, Grace R. yenilenebilir enerji portföy deneyiminin değerlendirilmesi.Amerika Birleşik Devletleri'nde standartları Mitig Adapt Strate Glob Chang 2005;10(2): 237-63.
- [10] Unger T, Ahlgren EO. Ortak bir yeşil sertifika elektrik üzerindeki etkileri.piyasasının İskandinav ülkelerindeki ve CO-emisyon piyasaları Enerji Politikası 2005;33(16): 2152-63.
- [11] Marchenko OV. Yeşil sertifika piyasasının modellenmesi. Yenilenen Enerji 2008;33(8): 1953-8.
- [12] Barbose G, Bird L, Heeter J, Flores-Espino F, Wiser R. maliyeti ve faydaları. Amerika Birleşik Devletleri'nde yenilenebilir enerji portföy standartlarının Yenilenebilir Sürdürülebilir Enerji Rev 2016;52:523-33.
- [13] Jiang Y, Cao H, Yang L, Fei F, Li J, Lin Z. mekanizma tasarımı ve etki analiziYenilenebilir portföy standardının . Autom Electr Power Syst 2020;44:187-99.
- [14] Zhao X, Liang J, Ren L, Zhang Y, Xu J. enerji için üst düzey kurumsal tasarımDüşük karbonlu geçişi : yenilenebilir portföy standartları. Power Syst Technol 2018;42: 1164-9.
- [15] Lipp J, Danimarka, Almanya tan etkili yenilenebilir elektrik politikası için derslerve Birleşik Krallık'. Enerji Politikası 2007;35:5481-95.
- [16] Matsumoto K, Morita K, Mavrakts D, Konidari P. Japon politika değerlendirilmesi. Yenilenebilir enerji kaynaklarının teşviki için araçlarının Int J Green Energy 2017;14:724-36.
- [17] Liu C, Zuo J, Zhao D, Li S, Chen J. Yenilenebilir enerji mikro şebekelerinin esnek ve güvenli çalışması için enerji depolama sisteminin kullanımı üzerine bir inceleme. Proc CSEE 2020;40(1):1-18+ 369.
- [18] Shao Z, Zou X, Yuan X, Xiong Y, Yuan Y. pik yük kaydırma optimizasyonuGeliştirilmiş MOPSO algoritmasına dayalı olarak dağıtım şebekesinde . Sci Technol Eng 2020; 20(10):3984-9.
- [19] Li X, Xie S, Fang Z, Li F, Cheng S. paylaşılan enerji optimum yapılandırması Çoklu mikro şebeke için depolamanın ve maliyet tahsisi. Electr Power Autom Equip 2021;41(10): 44-51.
- [20] Chakraborty P, Baeyens E, Poola K, Khargonekar PP, Varaiya P. depolama paylaşımıAkıllı şebekede : koalisyonel bir oyun yaklaşımı. IEEE Trans Smart Grid 2019;10(4): 4379-90.
- [21] Yan D, Chen Y. Paylaşımlı için iş modeli ve fiyatlandırma mekanizması üzerine incelemeenerji depolama . Autom Electr Power Syst 2022;46(23):178-91.
- [22] Barbour E, Parra D, Awwad Z, Gonzalez M. Topluluk enerji depolaması: bir akıllı şebeke için akıllı seçim. Appl Energy 2018;212:489-97.
- [23] Jo J, Park J. Akıllı paylaşılan enerji depolama sistemi ile talep tarafı yönetimi. şebekede IEEE Trans Smart Grid 2020;11(5):4466-76.
- [24] Pan Q, Lin J, Sun W. ortak enerji depolamanın yapılandırılması ve işletim stratejisiEndüstriyel parklarda çok gövdeli güç yükü belirsizliğini dikkate alan . Comput Eng Softw 2020;41(7):260-96.
- [25] Kuang Y, Wang X, Wang J, Peng Q, Zhao H. sanal enerji santrali enerji paylaşım Stackelberg oyununa dayalı mekanizması. Power Syst Technol 2020;44(12):4556-64.
- [26] Liu J, Chen X, Xiang Y, Huo D, Liu J. optimum planlaması ve yatırım fayda Elektrik perakendecileri için ortak enerji depolamanın analizi. Int J Electr Power Energy Syst 2021;126:106561.
- [27] Cui S, Jiang W. için oyun tabanlı eşler arası enerji paylaşım yönetimi. Enerji binaları topluluğu Int J Electr Power Energy Syst 2020;123:106204.
- [28] Dai R, Esmailbeigi R, Charkhgard H. ortak enerji depolamanın kullanımıEnerji sistemlerinde : kapsamlı bir inceleme. IEEE Trans Smart Grid 2021;12(4): 3163-74.
- [29] Guo N, Wang Y, Yan G. Elektrik piyasasında çift taraflı işbirlikçi olmayan bir oyuntalep yanıtı ve arz fonksiyonlarının parametrelendirilmesi ile . Int J Electr Power Energy Syst 2020;126:106565.
- [30] Teixeira D, Gomes L, Vale Z. için tek birimli ve çok birimli açık artırma çerçevesiEşler arası işlemler . Int J Electr Power Energy Syst 2021;133:107235.
- [31] Yao H, Qu P, Qin H, Lou Z, Wei X, Song H. çok boyutlu elektrik gücü AFFC-GLDA-RL yöntemine . Enerji 2024;313:134180dayalı parametresi zaman serisi tahmini ve anomali dalgalanma analizi.
- [32] Tan J, Li Y, Zhang X. bölgesel çoklu enerji sisteminin optimizasyonu ve ticaretiKarbon emisyonunu dikkate alarak üniversite topluluğunda . Int J Electr Power Energy Syst 2021;137:107450.
- [33] Dong M, Su J, Zhao J, Dong Y, Du S. için hileli dengeleme işlemi stratejisiKomşuluk sahnesi kamu enerji dikkate alan çok ajanlı P2P elektrik ticareti depolamasını . Uygulama Enerji 2024;375:123909.
- [34] Karavas C, Arvanitis K, Papadakis G. çok ajanlı bir oyun teorisi yaklaşımıOtonom polienerajasyon mikro şebekelerinin merkezi olmayan enerji yönetimine . Energies 2017;10(11):1756-78.
- [35] Wu Z, Li Y, Gu W, Dong Z, Zhao J, Liu W, vd için zaman ölçekli voltaj kontrolü. Çok ajanlı derin takviye öğrenmeye dayalı dağıtım sistemi çok . Int J Electr Power Energy Syst 2023;147:108830.
- [36] Wu C, Gu W, Yi Z, Lin C, Long H. işbirlikçi olmayan diferansiyel oyun ve geri beslemeli Gerçek zamanlı elektrik piyasaları için Nash dengesi analizi. Int J Electr Power Energy Syst 2023;147:108830.
- [37] Mediawththe CP, Stephens ER, Smith DB, Mahanti A. rekabetçi enerji ticareti Komşuluk alanı ağlarında talep tarafı yönetimi için çerçevesi. IEEE Trans Smart Grid 2018;9(5):4313-22.
- [38] Pan R, Tang Z, Shi C, Wei M, Li A, Dai W. çok ajanlı optimum tahsisiEfendi-köle oyununa dayalı yatırım çoklu mikro şebeke sisteminin . China Electr Power 2022;55(6):65-73.
- [39] Zhang X, Chan K, Wang H, Hu J, Zhou B, Zhang Y, vd. oyun teorik planlama. Enerjiden yan dikkate alan bağımsız katılımcılarla entegre enerji sistemi için gaz istasyonlarının hizmetlerini Enerji 2019;176:249-64.
- [40] Wang X, Yang J, Zhang K, Zhang Shao WL. piyasa oyun teorisi analiziTalep tarafı katılım kaynakları için tabanlı işletim mekanizmasının . Int J Electr Power Energy Syst 2021;134:107456.
- [41] Shuai X, Wang X, Wu X, Wang Y, Song Z, Wang B, vd. eşler arası çoklu enerji Birbirine bağlı mikro şebekeler için dağıtılmış ticaret: genel bir Nash pazarlık yaklaşımı. Int J Electr Power Energy Syst 2021;138:107892.
- [42] Liu R, Bao Z, Yu Z, Zhang C. entegre dağıtılmış etkileşimli optimizasyonuKarbon piyasalarında . Int J Electr Power Energy Syst 2023;155:109628hiyerarşik enerji-karbon fiyatlandırmasını dikkate alan elektrik-ısı enerji sistemlerinin .
- [43] Rajaei A, Fattaheian-Dehkordi S, Fotuhi-Firuzabad M, Moeini-Aghtaie M. ADMM tabanlı sistemlerinin . Int J Electr Power Energy Syst 2021;132:107126çoklu mikro şebeke dağıtım merkezi olmayan transaktif enerji yönetimi.
- [44] Ding J, Gao C, Song M, Yan X, Chen T. çok aracı optimum işletimiNash pazarlığına dayalı entegre enerji sisteminde elektrik-ısı-hidrojen paylaşımının . Int J Electr Power Energy Syst 2023;148:108930.
- [45] Xie R, Yu Z, Dou Z, Qiao M, Zhao Y, Wang Y. rüzgar-güneş-CHP çok ajanlı optimum Pazarlık gücüne dayalı operasyon stratejisi. Electr Power Constr 2023;44(1): 118-28.
- [46] Wang Z, Chen L, Li X, Mei S. İşbirlikçi altında Çoklu Park Düşük karbonlu optimum çizelgeleme.oyuna dayalı enerji paylaşım modu Yüksek Volt Eng 2023;49(4): 1380-91.
- [47] Huang H, Chen X, Zha J. Bölünmüş enerji işbirliği topluluğu ve o t o n o m çoklu park entegre enerji sistemi için ortak optimum çizelgeleme. Power Syst Technol 2022;46(8):2955-63.
- [48] Cui S, Wang Y, Liu X, Wang Z, Xiao J. Ekonomik depolama paylaşım çerçevesi: asimetrik pazarlık tabanlı enerji işbirliği. IEEE Trans Ind Inform 2021;17 (11):7489-500.
- [49] Britz V, Herings PJJ, Predtetchinski A. Asimetrik için işbirlikçi olmayan destekNash pazarlık çözümü . J Econ Theory 2010;145(5):1951-67.
- [50] Kawamori T. Asimetrik Nash pazarlık kooperatif olmayan bir temeliçözümünün . J Math Econ 2014;52:12-5.
- [51] Peng D, Xiao H, Pei W, Kong L. paylaşılan enerji dağıtılmış optimizasyon modeli. ADMM'ye dayalı elektrik şebekesi yardımcı hizmetlerine katılan depolamanın Electr Power Autom Equip 2024;44(2):1-13.