

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ORTAK ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİNİN ELEKTRİK GÜÇ
SİSTEMLERİNDE TALEP CEVABI KONSEPTİ İÇİN KULLANILMASI**

ALPER ÇİÇEK

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ELEKTRİK TESİSLERİ PROGRAMI**

**DANIŞMAN
DOÇ. DR. OZAN ERDİNÇ**

İSTANBUL, 2018

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ORTAK ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİNİN ELEKTRİK GÜÇ
SİSTEMLERİNDE TALEP CEVABI KONSEPTİ İÇİN KULLANILMASI

Alper ÇİÇEK tarafından hazırlanan tez çalışması 03.05.2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Ozan ERDİNÇ
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Ozan ERDİNÇ
Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Oğuzhan CEYLAN
Kadir Has Üniversitesi

Prof. Dr. Nurettin UMURKAN
Yıldız Teknik Üniversitesi

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez çalışmamın her aşamasında değerli görüşleriyle beni yönlendiren, ilgisini hiç esirgemeyen, tecrübeleri ile her daim destek olan danışman hocam Sayın Doç. Dr. Ozan ERDİNÇ'e ve çalışmalarımın her aşamasında özverili bir şekilde bana destek olan ve yol gösteren Arş. Gör. İbrahim ŞENGÖR'e teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca desteklerini hissettiğim ve her zaman yanımda olan sevgili aileme ve çalışmalarım süresince bana gönüllerini ve kapılarını açan BOZKURT ailesine teşekkür ederim.

Mayıs, 2018

Alper ÇİÇEK

İÇİNDEKİLER

| | Sayfa |
|--|-------|
| SİMGE LİSTESİ..... | vi |
| KISALTMA LİSTESİ..... | x |
| ŞEKİL LİSTESİ..... | xi |
| ÇİZELGE LİSTESİ | xii |
| ÖZET | xiii |
| ABSTRACT..... | xv |
| BÖLÜM 1 | |
| GİRİŞ..... | 1 |
| 1.1 Literatür Özeti | 1 |
| 1.2 Tezin Amacı | 5 |
| 1.3 Hipotez | 6 |
| BÖLÜM 2 | |
| ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİ | 8 |
| 2.1 Enerji Depolama Sistemlerine Genel Bakış..... | 8 |
| 2.1.1 Batarya Tabanlı Enerji Depolama Sistemleri | 11 |
| 2.1.2 Sıkıştırılmış Hava Enerji Depolama Sistemleri | 12 |
| 2.1.3 Pompalanmış Su Enerji Depolama Sistemleri | 13 |
| 2.1.4 Volanlar | 13 |
| 2.1.5 Süperkapasitörler | 13 |
| 2.1.6 Hidrojen Tabanlı Enerji Depolama Sistemleri | 14 |
| 2.1.7 Akış Bataryalar | 14 |
| 2.1.8 Süperiletken Manyetik Enerji Depolama Sistemleri..... | 15 |
| 2.1.9 Araçtan Şebekeye Enerji Depolama Sistemleri (Vehicle to Grid – V2G)..... | 15 |
| 2.2 Ortak Enerji Depolama Sistemleri..... | 18 |

BÖLÜM 3

| | |
|--|----|
| SUNULAN SİSTEMİN MATEMATİKSEL MODELLEMESİ | 28 |
| 3.1 Güç Akışı Analizi | 28 |
| 3.2 MILP Matematiksel Modeli..... | 30 |
| 3.2.1 Amaç Fonksiyonu..... | 30 |
| 3.2.2 Kirchhoff Kanunları | 31 |
| 3.2.3 Bara Enjeksiyonları | 32 |
| 3.2.4 Bara Gerilimleri ve Dal Akımları Sınırları | 33 |
| 3.2.5 Açısız Referans Bara | 35 |
| 3.2.6 Ortak Enerji Depolama Sistemi Modeli | 36 |

BÖLÜM 4

| | |
|--|----|
| TEST SONUÇLARI VE YORUMLAR | 39 |
| 4.1 Matematiksel Modelin Güç Akışı Bölümünün Test Edilmesi | 39 |
| 4.2 Matematiksel Model Kullanılarak Yapılan Uygulama | 42 |
| 4.3 Sonuçlar ve Karşılaştırmalar | 47 |

BÖLÜM 5

| | |
|--|----|
| SONUÇ VE ÖNERİLER | 53 |
| KAYNAKLAR | 55 |
| EK-A | |
| ÖNERİLEN KARIŞIK TAMSAYILI DOĞRUSAL MODELİNİN GAMS KODLARI | 59 |
| ÖZGEÇMİŞ | 68 |

SİMGE LİSTESİ

| | |
|----------------------------|--|
| CE_{OEDS} | Ortak enerji depolama sisteminin şarj verimliliği |
| $\cos \theta_k^{ref}$ | k referans barasındaki aktif ve reaktif güç arasındaki θ açısının kosinüs değeri |
| CR_{OEDS} | Ortak enerji depolama sisteminin şarj olurken şebekeden çektiği güç [kW] |
| $d_{(t,k)}^P$ | t anında k barasındaki tüketicilerin toplam aktif yük değeri [kW] |
| $d_{(t,k)}^Q$ | t anında k barasındaki tüketicilerin toplam reaktif yük değeri [kVAr] |
| DE_{OEDS} | Ortak enerji depolama sisteminin deşarj verimliliği |
| DR_{OEDS} | Ortak enerji depolama sisteminin deşarj gücü [kW] |
| $l_{(t,k,m)}$ | t anında k barasından m barasına akan akımın hesaplanmasında kullanılan yardımcı karar değişkeni [A] |
| $\hat{l}_{(t,k,m)}^{r,s}$ | t anında k barasından m barasına akan akımın hesaplanmasında kullanılan yardımcı karar değişkeni için r reel ve s imajiner değerlere bağlı değerlendirme noktaları ve değerlendirilen değerler [A] |
| $I_{(t,k,m)}^{max}$ | t anında k barasından m barasına akabilecek izin verilen maksimum akım [A] |
| $l_{(t,k,m)}^{im}$ | t anında k barasından m barasına akan reaktif akımın hesaplanmasında kullanılan yardımcı karar değişkeni [A] |
| $\hat{l}_{(t,k,m)}^{im,s}$ | t anında k barasından m barasına akan reaktif akımın hesaplanmasında kullanılan yardımcı karar değişkeni için s imajiner bileşene bağlı değerlendirme noktaları ve değerlendirilen değerler [A] |
| $I_{(t,k,m)}^{im}$ | t anında k barasından m barasına akan reaktif akım[A] |
| $I_{(t,m,k)}^{im}$ | t anında m barasından k barasına akan reaktif akım[A] |
| $I_{d(t,k)}^{im}$ | t anında k barasındaki reaktif yük akımı [A] |
| $I_{g(t,k)}^{im}$ | t anında k referans barasından çekilen reaktif akım [A] |
| $l_{(t,k,m)}^{re}$ | t anında k barasından m barasına akan aktif akımın hesaplanmasında kullanılan yardımcı karar değişkeni [A] |
| $\hat{l}_{(t,k,m)}^{re,r}$ | t anında k barasından m barasına akan aktif akımın hesaplanmasında kullanılan yardımcı karar değişkeni için r reel bileşene bağlı değerlendirme noktaları ve değerlendirilen değerler [A] |

| | |
|--------------------------|---|
| $I_{(t,k,m)}^{re}$ | t anında k barasından m barasına akan aktif akım [A] |
| $I_{(t,m,k)}^{re}$ | t anında m barasından k barasına akan aktif akım [A] |
| $I_{d(t,k)}^{re}$ | t anında k barasındaki aktif yük akımı [A] |
| $I_{g(t,k)}^{re}$ | t anında k referans barasından çekilen aktif akım [A] |
| $I_{(t,k)}^{OEDS_ch}$ | t anında k barasındaki ortak enerji depolama sisteminin şarj akımı [A] |
| $I_{(t,k)}^{OEDS_chs}$ | t anında k barasındaki ortak enerji depolama sisteminin şarj akımının şarj için ikili karar değişkeni ile çarpımından elde edilen değer [A] |
| $I_{(t,k)}^{OEDS_dis}$ | t anında k barasındaki ortak enerji depolama sisteminin deşarj akımı [A] |
| $I_{(t,k)}^{OEDS_diss}$ | t anında k barasındaki ortak enerji depolama sisteminin deşarj akımının deşarj için ikili karar değişkeni ile çarpımından elde edilen değer [A] |
| M | Çok büyük bir sayı |
| $P_{(t,k)}^{OEDS_ch}$ | Ortak enerji depolama sisteminin şarj gücü [kW] |
| $P_{(t,k)}^{OEDS_dis}$ | t anında k barasındaki ortak enerji depolama sisteminin şebekeye verdiği güç [kW] |
| r | Değerlendirme noktasının reel bileşeni |
| $R_{(k,m)}$ | k ve m baralarını birbirine bağlayan dalın omik direnci [ohm] |
| s | Değerlendirme noktasının imajiner bileşeni |
| $\sin \theta_k^{ref}$ | k referans barasındaki aktif ve reaktif güç arasındaki θ açısının sinüs değeri |
| $SOE_{(t,k)}^{OEDS}$ | t anında k barasındaki ortak enerji depolama sisteminin enerji durumu [kWh] |
| $SOE_{(t,k)}^{OEDS,ini}$ | k barasındaki ortak enerji depolama sisteminin zamanın başlangıcındaki enerji durumu [kWh] |
| $SOE_{(t,k)}^{OEDS,max}$ | t anında k barasındaki ortak enerji depolama sistemi için izin verilen maksimum enerji durumu [kWh] |
| $SOE_{(t,k)}^{OEDS,min}$ | t anında k barasındaki ortak enerji depolama sistemi için izin verilen minimum enerji durumu [kWh] |
| t | Zaman |
| T | Zaman periyodu sayısı |
| $u_{(t,k)}^{OEDS_ch}$ | t anında k barasındaki ortak enerji depolama sisteminin şarj durumu için ikili karar değişkeni |
| $u_{(t,k)}^{OEDS_dis}$ | t anında k barasındaki ortak enerji depolama sisteminin deşarj durumu için ikili karar değişkeni |

| | |
|--------------------------|--|
| $V_{(t,k)}$ | t anında k barasındaki gerilim [kV] |
| V_k^{re} | k barasındaki gerilimin reel bileşeni [kV] |
| V_k^{ref} | k referans barasındaki gerilim [kV] |
| V_k^{im} | k barasındaki gerilimin imajiner bileşeni [kV] |
| $\hat{V}_k^{r,s}$ | k barasındaki gerilimin r reel ve s imajiner bileşenlere bağlı değerlendirme noktaları ve değerlendirilen değerleri [kV] |
| $V_{(t,k)}^{im}$ | t anında k barasındaki gerilimin imajiner bileşeni [kV] |
| $V_{(t,m)}^{im}$ | t anında m barasındaki gerilimin imajiner bileşeni [kV] |
| $\hat{V}_k^{im,s}$ | k barasındaki imajiner gerilimin s imajiner bileşene bağlı değerlendirme noktaları ve değerlendirilen değerleri [kV] |
| $V_{(t,k)}^{max}$ | t anında k barasındaki gerilim için izin verilen maksimumdeğer [kV] |
| $V_{(t,k)}^{min}$ | t anında k barasındaki gerilim için izin verilen minimum değer [kV] |
| $V_{(t,k)}^{re}$ | t anında k barasındaki gerilimin reel bileşeni [kV] |
| $V_{(t,m)}^{re}$ | t anında m barasındaki gerilimin reel bileşeni [kV] |
| $\hat{V}_k^{re,r}$ | k barasındaki reel gerilimin r reel bileşene bağlı değerlendirme noktaları ve değerlendirilen değerleri [kV] |
| z | Amaç fonksiyonu |
| $X_{(k,m)}$ | k ve m baralarını birbirine bağlayan dalın reaktansı [ohm] |
| $\lambda_{(t,k)}^{r,s}$ | t anında k barasındaki gerilimin bulunmasında kullanılan Special Ordered Sets of Type 2 yaklaşımında r reel ve s imajiner değerlere bağlı ağırlıklar |
| $\omega_{(t,k,m)}^{r,s}$ | t anında k barasından m barasına akan akımın bulunmasında kullanılan Special Ordered Sets of Type 2 yaklaşımında r reel ve s imajiner değerlere bağlı ağırlıklar |
| $\xi_{(t,k)}$ | Gerilimin reel bileşeninin, reel ve imajiner bileşenlerin karelerinin toplamına oranı |
| $\hat{\xi}_k^{r,s}$ | Gerilimin reel bileşeninin, reel ve imajiner bileşenlerin karelerinin toplamına oranının bulunmasında kullanılan değerlendirme noktaları ve değerlendirilen değerler |
| $\zeta_{(t,k)}$ | Gerilimin imajiner bileşeninin, reel ve imajiner bileşenlerin karelerinin toplamına oranı |
| $\hat{\zeta}_k^{r,s}$ | Gerilimin imajiner bileşeninin, reel ve imajiner bileşenlerin karelerinin toplamına oranının bulunmasında kullanılan değerlendirme noktaları ve değerlendirilen değerler |
| Γ^{re} | Gerilimin reel bileşeni için değerlendirme noktaları kümesi |
| Γ^{im} | Gerilimin imajiner bileşeni için değerlendirme noktaları kümesi |

| | |
|----------------|---|
| Π' | Akım için değerlendirme noktaları kümesi |
| Ω_B | Modellenen sistemdeki tüm baraların kümesi |
| Ω_{REF} | Modellenen sistemdeki tüm referans baraların kümesi |
| Ψ_C | Modellenen sistemdeki tüm dalların kümesi |
| Ψ_k | Ortak enerji depolama sistemlerinin yer aldığı tüm baraların kümesi |
| ΔT | Bir saatteki periyot sayısı |



KISALTMA LİSTESİ

GAMS General Algebraic Modeling System
MILP Mixed-Integer Linear Programming



ŞEKİL LİSTESİ

| | Sayfa |
|---|-------|
| Şekil 2. 1 CAISO rüzgâr ve güneş santralleri üretim verileri (04-06/01/2018)..... | 9 |
| Şekil 2. 2 Enerji depolama sisteminin pik enerji talebini azaltması [24] | 11 |
| Şekil 2. 3 Depolama teknolojilerinin karşılaştırılması [24] | 15 |
| Şekil 2. 4 Ortak enerji depolama sisteminin kontrol ve haberleşme yapısı..... | 22 |
| Şekil 2. 5 Ortak enerji depolama sisteminin güç dönüştürücü sistemi [28]..... | 25 |
| Şekil 2. 6 Ortak enerji depolama sistemi ve transformatörün birlikte kullanımı [29] .. | 27 |
| Şekil 3. 1 Dağıtım sisteminin kısa hat modeli ve fazör diyagramı | 28 |
| Şekil 4. 1 Matematiksel modellemesi yapılan hat modeli | 40 |
| Şekil 4. 2 Ev 1'in esnek olmayan yük profili (tek kişinin yaşadığı konut) | 42 |
| Şekil 4. 3 Ev 2'nin esnek olmayan yük profili (gün boyu çalışan çiftin yaşadığı konut) | 42 |
| Şekil 4. 4 Ev 3'ün esnek olmayan yük profili (dört üyeli bir ailenin yaşadığı konut) ... | 43 |
| Şekil 4. 5 Sistemdeki toplam aktif yük (kW) | 43 |
| Şekil 4. 6 Ortak enerji depolama sistemlerinin yer aldığı baralar | 46 |
| Şekil 4. 7 Senaryo 2'de ortak enerji depolama sistemlerinin enerji durumu | 48 |
| Şekil 4. 8 Senaryo 3'te ortak enerji depolama sistemlerinin enerji durumu | 48 |
| Şekil 4. 9 Senaryo 2'de şebekeden çekilen aktif akım değerinin temel durumdaki şebekeden çekilen aktif akım ile karşılaştırılması | 49 |
| Şekil 4. 10 Senaryo 3'te şebekeden çekilen aktif akım değerinin temel durumdaki şebekeden çekilen aktif akım ile karşılaştırılması | 49 |
| Şekil 4. 11 Senaryolarda şebekeden çekilen aktif akım değerleri..... | 50 |
| Şekil 4. 12 Senaryo 3'te Fider 1'den akan akım ve bu fiderde yer alan ortak enerji depolama sistemlerinin enerji durumları | 51 |
| Şekil 4. 13 Senaryo 3'te Fider 2'den akan akım ve bu fiderde yer alan ortak enerji depolama sistemlerinin enerji durumları | 51 |
| Şekil 4. 14 Senaryo 3'te Fider 3'den akan akım ve bu fiderde yer alan ortak enerji depolama sistemlerinin enerji durumları | 52 |

ÇİZELGE LİSTESİ

| | Sayfa |
|---|-------|
| Çizelge 2. 1 Çeşitli enerji depolama sistemlerinin karşılaştırılması [25], [27]..... | 16 |
| Çizelge 2. 2 Dünyada en büyük değerlere sahip depolama sistemlerinden örnekler.. | 17 |
| Çizelge 2. 3 Ortak enerji depolama sistemlerinin pik yükü azaltmak için uygulandığı örnekler..... | 19 |
| Çizelge 2. 3 Ortak enerji depolama sistemlerinin pik yükü azaltmak için uygulandığı örnekler (devamı) | 20 |
| Çizelge 2. 3 Ortak enerji depolama sistemlerinin pik yükü azaltmak için uygulandığı örnekler (devamı) | 21 |
| Çizelge 2. 3 Ortak enerji depolama sistemlerinin pik yükü azaltmak için uygulandığı örnekler (devamı) | 22 |
| Çizelge 4. 1 Test sistemi yük verileri | 40 |
| Çizelge 4. 2 Test sistemi hat verileri | 41 |
| Çizelge 4. 3 Test sistemi sonuçları | 41 |
| Çizelge 4. 4 Ev aletleri bilgileri | 44 |
| Çizelge 4. 5 Baralarda ev sayıları | 45 |
| Çizelge 4. 6 Ortak enerji depolama sistemi verileri | 46 |
| Çizelge 4. 7 Hat kayıpları | 47 |

ORTAK ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİNİN ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMLERİNDE TALEP CEVABI KONSEPTİ İÇİN KULLANILMASI

Alper ÇİÇEK

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Ozan ERDİNÇ

Gelecekte başta elektrikli taşıma olmak üzere elektriksel yüklerin daha da artacağı tahmin edildiğinden, güç sistemlerinde ciddi problemler meydana gelme ihtimali söz konusudur. Artan enerji talebi pik yükün artmasına neden olacak ve bu durumda ya elektrik santralleri üretimlerini arttıracak ya da dinamik bir fiyatlama yapısına sahip toptan bir pazardan elektrik enerjisi satın alınacaktır. Bunun sonucunda da elektrik maliyetlerinde artış meydana gelecektir. Bu durum, yenilenebilir enerji kaynaklarını barındıran bir güç sistemine gereksinimi arttırmaktadır. Çünkü enerjinin bol ve ucuz olması enerjide aranan en önemli özelliklerdir. Fakat bu kaynaklar doğası gereği değişken güç üretimlerine sahiptirler ve güç sistemlerine entegre edildiklerinde, enerji üretimlerinin tahmin edilmesinde yaşanan zorluklar ve enerji üretimlerinde kısa sürede yaşayabildikleri büyük değişimler nedeniyle birçok problem ile karşı karşıya kalınmaktadır. Bu duruma bir çözüm olarak üretimin talebe göre yönetilmesi yerine talep gücün pik talebi azaltacak şekilde yönetilmesi olarak adlandırılan talep cevabı programları günümüzde oldukça yaygınlaşmıştır. Fakat bu programlar tüketicinin konforu açısından uzun süreli uygulanamamaktadır. Oysa hem yenilenebilir enerji kaynaklarının hem de pik yükün oluşturacağı bu zorluklar, tüketicinin enerji alışkanlıklarını değiştirmeden düzenleme imkânı sunan enerji depolama sistemleri ile etkili bir şekilde çözülebilir. Enerji depolama sistemlerini içeren bir sistemde enerji tüketiminin az olduğu ya da elektrik birim fiyatının daha ekonomik olduğu saatlerde enerji depolama sisteminde enerji depolanabilir ve enerji tüketiminin çok ya da elektrik birim fiyatının daha yüksek olduğu saatlerde sisteme enerji depolama sisteminden enerji

tedarik edilebilir. Bu sistemler şebeke kayıplarını azaltma, yük faktörünü düzenleme, enerji maliyetini düşürme gibi şebeke ve tüketici açısından birçok fayda sağlamaktadır.

Enerji depolama sistemlerinin türünün seçimine gelindiğinde ise; birçok ülkede yer alan mevcut büyük ölçekli enerji depolama sistemlerinden farklı olarak, bir grup tüketiciye hizmet eden ve büyük ölçekli enerji depolama sistemlerinden oldukça küçük olan bir ortak enerji depolama sisteminin kullanılmasının ekonomik açıdan daha uygun olacağı görülmektedir. Konuya küçük boyutlu enerji depolama sistemlerinin bireysel kullanımı açısından bakıldığında ise bunlar ekonomik açıdan makul değildir. Ortak enerji depolama sistemi bir şebekede bölgesel ve yerel uygulamalar olmak üzere birçok amaç için kullanılabilir. Ayrıca farklı konumlarda olsalar bile bir kontrolör yardımı ile koordine edilerek şebekede aynı görev için hizmet edebilmektedirler. Aynı zamanda PV ve rüzgâr güç üretim santralleri ile kolaylıkla entegre olabilmektedirler ve tüketicilere fazla yenilenebilir enerjilerini ortak enerji depolama sistemlerine satarak elektrik maliyetlerini düşürme imkânı da sunmaktadırlar.

Bu çalışmada baralara ortak enerji depolama sistemlerinin yerleştirildiği bir AC güç şebekesinin Karışık Tamsayı Doğrusal Programlama (Mixed Integer Linear Programming – MILP) modeli sunulmuştur. Oluşturulan model General Algebraic Modeling System (GAMS)'de modellenmiştir. İlk olarak güç akışı kısmının doğruluğu bir test sisteminde irdelenmiştir ve aynı sistem için yapılan başka çalışmaların sonuçları ile yakın sonuç elde edilmiştir. Çalışmada amaç fonksiyonu, aktif güç kayıplarının minimize edilmesi şeklindedir. Çalışmada 3 senaryo ele alınmıştır. İlk senaryoda ortak enerji depolama sistemi yer almamaktadır. 2. ve 3. senaryolarda bazı baralarda ortak enerji depolama sistemleri yer almaktadır. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, ortak enerji depolama sistemlerinin kullanımı ile pik saatlerde şebekeden enerji talebinin düştüğü ve toplam şebeke kayıplarının azaldığı görülmüştür. Ortak enerji depolama sistemleri pik enerji talebinin olduğu periyotlardan önce şarj olmuştur. Pik periyotlarda ortak enerji depolama sistemlerinin enerji durumlarının azaldığı ve sisteme enerji tedarik edildiği görülmüştür. Ortak enerji depolama sistemleri ile dolaylı yoldan pik saatlerdeki enerji ihtiyacının bir kısmı pik olmayan saatlere kaydırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Aktif güç kayıpları, güç akışı, ortak enerji depolama sistemleri, pik yükün azaltılması

**USE OF COMMON ENERGY STORAGE SYSTEMS FOR DEMAND RESPONSE
IN ELECTRIC POWER SYSTEMS**

Alper ÇİÇEK

Department of Electrical Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Assoc. Prof. Dr. Ozan ERDİNÇ

In the future, it is expected that the electric loads, especially electric transportation, will increase further, thus serious problems may arise in power systems. Increasing energy demand will cause to increase of peak load and in this case either the power plants will increase their production or electricity will be purchased from a wholesale market with a dynamic pricing structure. As result of this, the cost of electricity will increase. This situation increases the need for power systems with renewable energy sources. Because being abundant and cheap of energy are the most important features sought out in the energy. But these sources have inherently variable power production and are confront with many problems when are integrated into power systems due to the difficulties experienced in estimating of energy production and major changing that they may experience in energy production in the short term. As a solution of this, managing the demand in a way that reduces peak demand of power demand named demand response programs instead of managing the production according to the demand, nowadays has become quite widespread. But these programs can not be implemented for a long time in terms of the comfort of the consumer. However, these difficulties created by both renewable energy sources and peaks loads can be effectively solved by energy storage systems that enable the opportunity to regulate that consumer's energy habits without changing. In a system that includes energy storage systems, energy can be stored in the energy storage systems during the hours when the electricity price is more economical or when the demand is low and can be provided from energy storage systems during the hours when the electricity price is high or when the demand is too high. These

systems provide many benefits in terms of utilities and consumers such as reducing network losses, adjusting load factor, reducing energy cost.

When it comes to choosing energy storage systems, it seems economically more convenient to use a common energy storage system that serves a group of consumers and is quite small in scale than large energy storage systems unlike existing large size energy storage systems in many countries. When viewed from the standpoint of individual use of small scale energy storage systems, these are not economical. The common energy storage system can be used for many purposes in a network including regional and local applications. They can also serve same task in the network by coordinated with the help of a controller even if they are in different location. Also they can easily integrate with PV and wind power generation plants and offer opportunity to consumers for reduce their electricity costs by selling their surplus renewable energy to common energy storage systems.

In this study, a Mixed-Integer Linear Programming (MILP) model of an AC power grid in which common energy storage systems locate to buses are presented. The created model is modeled in GAMS (General Algebraic Modeling System). Firstly, the accuracy of the power flow has been examined in a test system and close result were obtained to the results of other studies on the same system. The aim function in study is to minimize active power losses. Three scenarios were addressed in the study. In the first scenario, there is no common energy storage system. In the Scenario 2 and 3, common energy storage systems are located in the some buses. According to the results obtained from study, it is seen that the using of common energy storage systems reduces grid losses and energy demand from network at peak times. The common energy storage systems charged before the peak demand period. During the peak periods, energy states of common energy storage systems reduced and energy was supplied to the system. With the help of common energy storage systems, a part of the energy need in the peak periods is shifted to non-peak periods.

Keywords: Common energy storage systems, peak load reduction, power flow, real power losses

1.1 Literatür Özeti

Literatürde ortak enerji depolama sistemleri konusunda enerji maliyetlerinin azaltılması, enerji depolama sisteminin boyutlandırılması ve konumunun belirlenmesi, yenilenebilir enerji kaynaklarının olumsuz etkilerinin azaltılması, birden fazla ortak enerji depolama sisteminin kullanılması ile şebeke güvenilirliğinin ve güç kalitesinin artırılması, ortak bir depolama sisteminin tüketiciler arasında hakkaniyetli paylaşımı, şebekede pik yükün azaltılması, tüketicilerin özel hayat gizliliği açısından depolama sistemi ile yaptıkları haberleşme verilerinin gizliliği, tüketicilerin fazla yenilenebilir enerjilerini depolama sistemine satmaları sonucunda elde ettikleri ekonomik kazanımlar, elektrik şirketi ve tüketici sahipliğinde olan ortak enerji depolama sistemlerinin yer aldığı durumların karşılaştırılması ile ilgili çalışmalar yer almaktadır. Fakat ortak enerji depolama sistemi dünyada yeni gelişen bir konsepttir. Bu nedenle literatürde bu konu ile ilgili çok fazla sayıda çalışma yer almamaktadır.

Rahbar vd. [1]'de yaptıkları çalışmada yenilenebilir enerji kaynakları ve tüketiciler arasında ortak bir enerji depolama sisteminin yer aldığı bir sistemdeki enerji yönetim problemini incelemişlerdir. Tüm kullanıcılara belirli bir fayda katsayısı belirlenerek, merkezi kontrolör ile ortak enerji depolama sisteminin şarj/deşarj gücünün optimizasyonu sağlanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, bireysel enerji depolama sistemleri ile karşılaştırıldığında ortak enerji depolama sistemlerinin kullanımı ile elde edilen toplam kârın %10 arttırılabileceği gösterilmiştir. Ayrıca [2]'de; [1]'de yaptıkları çalışmaya talep cevabı uygulaması için, talep edildiği zaman karşılanması gereken sabit

yüklerin yanında kontrol edilebilir yükleri de eklemişlerdir. Burada kontrol edilebilir yükler çalışma periyotları değiştirilebilir şekilde esnekliğe sahip yüklerdir. Fakat bu çalışmada, amaç fonksiyonunu tüketicilerin kârını en üst düzeye çıkarmak olarak ele almışlardır.

Paridari vd. [3]'te tüketiciler arasında ortak bir enerji depolama sisteminin ve tüketicilerin kontrol edilebilen akıllı cihazlarının yer aldığı bir sistemin enerji yönetim yapısını incelemişlerdir. Bu yapıda tüketiciler bir toplayıcı (aggregator) aracılığı ile koordine edilmektedir ve talep cevabı sinyalleri toplayıcı aracılığı ile iletilmektedir. Toplayıcı, tüketicilerin talep profilini değiştirmek için ekonomik teşvikler sunmaktadır ve ortak kaynakların adaletli dağıtılmasını garanti etmektedir. Tüketiciler ve toplayıcı arasında sınırlı haberleşme vardır ve tüketici gizliliği dikkate alınmıştır. Fakat bu çalışmada yenilenebilir enerji kaynakları sisteme dahil edilmemiştir.

Mediwaththe vd. [4]'te bir ortak enerji depolama sisteminden ve kendi PV güç üretim sistemlerine sahip tüketicilerden oluşan bir mahalle için gün öncesi merkezi olmayan enerji yönetim problemini incelemişlerdir. Bu çalışma, ortak enerji depolama sisteminin optimum gün öncesi stratejisini bulmak için yapılan ilk oyun teorisi yaklaşımıdır. Çalışmada elde edilen sonuçlara göre toplam elektrik talebinin gün içerisinde dengeli bir şekilde dağıtılabileceği ve enerji maliyetinin azaltılabileceği görülmüştür. Fakat bu çalışmada amaç fonksiyonu enerji maliyetinin minimize edilmesi olarak belirlenmiştir ve hat kayıpları dikkate alınmamıştır.

Huq vd. [5]'te PV güç üretim sistemleri ve ortak bir enerji depolama sistemi içeren bir bölge için enerji yönetim sistemi yapısını incelemişlerdir. Bu çalışmada amaç fonksiyonu, PV güç üretim sistemlerini ve ortak enerji depolama sistemini kullanarak şebekedeki enerji maliyetini minimize etmek olarak hedeflenmiştir. Önerilen model ile pik enerji tüketiminin azaltılabileceği, şebekede verimliliğin arttırılabileceği ve yenilenebilir enerji kaynaklarının olumsuz etkilerinin azaltılabileceği görülmüştür.

Dimitrov vd. [6]'da tüketicilerin ortak enerji depolama sisteminin başka bir tüketiciye tahsis edilen ve kullanmadığı kapasite kısmı için teklif verdikleri çift yönlü müzakere sisteminden oluşan bir yapı sunmuşlardır. Bu yapıda tüm muhtemel ikili teklifler değerlendirilmektedir ve sadece en iyi olan teklif uygulanmaktadır. Ayrıca enerji

depolama sistemini verimli bir şekilde kullanmak için tüketicilerin ortak enerji depolama sistemini hangi oranda kullanacakları uygun paylaşım stratejileri ile belirlenmiştir.

Wang vd. [7]'de tüketici ve dağıtım sistemi operatörü arasındaki ortak bir enerji depolama sistemi ve talep cevabı programlarının yer aldığı bir sistemin enerji yönetim yapısını tanıtmışlardır. Fakat bu çalışmada ortak enerji depolama sistemi elektrik şirketi sahipliğinde değil, tüketici ve dağıtım sistemi operatörü ortak sahipliğindedir. Aynı zamanda ortak enerji depolama sistemi baralarda değil tüketicinin bireysel konutunda yer almaktadır. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre önerilen strateji ile tüketicilerin enerji maliyetlerinin düşürülebileceği ve aynı zamanda elektrik şirketi yatırımlarının ertelenebileceği görülmüştür. Yaho vd. [8]'de ortak bir bataryanın ve gerçek zamanlı elektrik fiyatlandırma yapısının kullanıldığı bir sistemdeki fayda-maliyet analizini araştırmışlardır. Bu çalışma literatürdeki ilk gerçek zamanlı elektrik fiyatlandırması modelidir. Önerilen modelde enerji depolama sisteminin şarj ve deşarjı, tüm tüketicilerin enerji talepleri ve elektrik fiyat verileri merkezi bir kontrol sistemi tarafından yönetilmektedir. Fakat hat kayıplarının azaltılması ve yük faktörünün iyileştirilmesi konuları [7] ve [8]'de dikkate alınmamıştır. Bu çalışmalarda amaç fonksiyonunu enerji maliyetinin minimize edilmesi olarak belirlemişlerdir.

Hung vd. [9]'da pik saatlerde artan enerji talebi nedeniyle daha da artan enerji kayıplarının minimize edilmesini amaçlayan bir çalışma sunmuşlardır. Bu amaçla kayıplar dikkate alınarak ortak enerji depolama sisteminin ideal yerinin tespit edilmesi, boyutlandırılması ve güç faktörünün tanımlanması ile ilgili bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada aynı zamanda ortak enerji depolama sistemi ile birlikte kapasitör yerleşiminin kombinasyonu da ele alınmıştır. Fakat bu çalışmada sunulan model Karışık Tamsayılı Doğrusal Programlama (Mixed Integer Linear Programming – MILP) 'ya dayalı değildir ve aynı zamanda talep cevabı uygulamalarına ve yenilenebilir enerji kaynaklarına yer verilmemiştir.

Parra vd. [10]'da kullanım zamanı fiyatlandırması (Time of Use Pricing) ve gerçek zamanlı fiyatlandırma (Real Time Pricing) tarifelerinde talep cevabı konsepti olarak kullanılan ortak enerji depolama sistemi bataryalarının performanslarını incelemiştir. Depolama sistemi bataryası olarak kurşun-asit ve lityum-iyon olmak üzere iki tür batarya ele

alınmıştır. Çalışmada elde edilen sonuçlara göre karşılaştırılan bu iki bataryadan lityum-iyon bataryaların daha verimli olduğu belirtilmiştir.

Thomas vd. [11]'de tek bir 13.2 kV dağıtım fiderinde 80 adet 25 kW/25kWh'lik ortak enerji depolama sisteminin toplamda 2 MW depolama kapasitesini oluşturduğu bir uygulama olan AEP Ohio GridSmart Demonstration projesini incelemiştir. Yapılan çalışmaya göre aynı anda kullanılan bir grup ortak enerji depolama sisteminin şebekede çeşitli fonksiyonlarda kullanılabileceği görülmüştür.

Arghandeh vd. [12]'de ortak enerji depolama sisteminin yer aldığı ve amaç fonksiyonunun enerji maliyetini minimize etmek olduğu gerçek zamanlı bir enerji yönetim yapısı sunmuşlardır. Çalışmada ayrıca Michigan'da 50 kWh'lik 20 adet ortak enerji depolama sisteminden oluşan gerçek bir uygulamayı da incelemiştir.

Bayram vd. [13] ve [14]'te ortak enerji depolama sisteminin optimum boyutlandırılması ile ilgili çalışmalar sunmuşlardır. Çalışma sonuçlarına göre ortak enerji depolama sistemlerinin uygulanabilir olduğu ve depolama sistemlerinin optimum boyutlandırılması ile önemli tasarruflar elde edilebileceği görülmüştür.

Wang vd. [15]'te ortak bir enerji depolama sisteminin stokastik bir modelini sunmuşlardır. Ortak enerji depolama sistemi modeli difüzyon yaklaşımına dayalı olarak gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan model batarya tabanlı bir ortak enerji depolama sistemi ve bir grup evsel tüketiciden oluşmaktadır. Eysel tüketicilerin bazılarının kendi rüzgâr türbinine sahip olduğu düşünülmüştür. Oluşturdukları bu sistemi kuzeydoğu Çin'in Jilin eyaletinde yer alan Changling rüzgâr çiftliğinden elde ettikleri gerçek verilerle test etmişlerdir. Modelde her bir rüzgâr türbininin güç üretimini belirlemek için Markov Modulated Rate Process (MMRP) kullanılmıştır.

Ven vd. [16]'da bir bataryanın en iyi performansta işletilebilmesi için bir batarya yönetim yapısı sunmuşlardır. Çalışmada çeşitli talep ve fiyatlar altında uzun vadeli enerji maliyetini en aza indirmek için enerji depolama sisteminde depolanacak enerjinin satın alınması ile ilgili düzenleme sorunları ele alınmıştır. Çalışmadan elde ettikleri sonuçlara göre aynı kapasite değerine sahip bireysel ve ortak enerji depolama sistemlerini ekonomik açıdan karşılaştırdıklarında, bireysel enerji depolama sistemlerine göre ortak enerji depolama sistemlerinin daha avantajlı olduğunu ifade etmişlerdir.

Roberts vd. [17]'de elektrik sistemi güvenilirliği için kullanılan yeni depolama sistemlerini ve bu depolama sistemlerinin şebekeye entegrasyonu ile ilgili yöntemleri incelemişlerdir. Çalışmada yenilenebilir enerji kaynaklarının sayısının giderek artması ile enerji depolama sistemlerinin yaygınlıklarının daha da artacağını ve bu sistemlerin daha dinamik yükleri barındıracak gelecek akıllı şebekelerde sistem güvenilirliğini arttıracakđını ifade etmişlerdir.

Miller vd. [18], Black vd. [19] ve Sardi vd. [20]'de ortak enerji depolama sistemleri ile ilgili genel bir değerlendirme sunmuşlardır. Bu çalışmalarda ortak enerji depolama sistemlerinin dağıtım sistemi güvenilirliğini arttırabileceği, pik yükü ve şebekedeki kayıpları azaltabileceği, transformatörün ekonomik ömrünü uzatabileceği, şebeke gerilim profilini iyileştirebileceği, yenilenebilir enerji kaynaklarının şebekeye entegresini kolaylaştırabileceği ve bu sistemlerin daha birçok uygulamada kullanılarak faydalanılabileceği ifade edilmiştir.

Zhu vd. [21]'te evsel bölgelerde yer alan, yerel ve bölgesel olarak tüketicilere faydalar sağlayan ortak enerji depolama sistemleri incelenmiştir. Ortak enerji depolama sistemleri için genel gereksinimler ve sistemin uygulanmasına engel durumlar ifade edilmiştir. Bu alışma ile hükümetler, elektrik şirketleri, mühendisler, araştırmacılar ve evsel tüketiciler arasında ortak bir anlayışın elde edilmesi amaçlanmıştır.

1.2 Tezin Amacı

Elektriğin pik saatlerde kullanımı sırasında çevresel açıdan olumsuzluklara sebep olan karbon emisyonlarının daha da artması ve pik enerji santrallerinin elektrik maliyetini arttırması nedeniyle pik saatlerdeki enerji talebinin azaltılmasına ihtiyaç vardır. Ayrıca Amerika Birleşik Devletleri (ABD) Enerji Bilgi İdaresi (U.S. Energy Information Administration – EIA) tarafından yapılan çalışmaya göre dünyadaki toplam enerji talebinin 2015 yılından 2040 yılına kadar %28 artacağı tahmin edilmektedir. Bu konular düşünöldüğünde gelecekte artan enerji talebi nedeniyle mevcut güç sistemlerinde ciddi problemler meydana gelebilecektir [22]. Bu durum güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, biyokütle, jeotermal enerji, gel-git enerjisi, dalga enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarını barındıran bir güç sistemine gereksinimi arttırmaktadır [2]. Fakat yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilecek güç, doğası gereği stokastik bir

yapıdadır ve bu kaynaklardan üretilen gücün tahmininde de zorluklar yaşanmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının şebekeye entegre edilmesiyle oluşacak bu zorluklar ortak enerji depolama sistemleri ile etkili bir şekilde giderilebilir. Bunun dışında ortak enerji depolama sistemleri akıllı şebeke işletiminde tüketicilere ve elektrik şirketlerine ekonomik açıdan fayda sağlayacak birçok uygulamada kullanılabilir. Elektrik şirketi sahipliğindeki bir ortak enerji depolama sistemi, pik enerji saatlerinde transformatörlerin ve hatların yükünü azaltacaktır. Pik yükün azaltılması dolayısıyla da akımın karesi ile orantılı değişen şebeke kayıplarının azaltılmasına yardımcı olacaktır. Bunların sonucunda yük faktörü daha iyi bir değere gelecek ve düşük yük faktörü nedeniyle oluşan ek kayıplar ve artan enerji maliyeti ortadan kaldırılacaktır.

Bu amaçla bu çalışmada, baralara ortak enerji depolama sistemlerinin yerleştirildiği bir AC elektrik güç şebekesinin MILP modeli sunulmuştur. Oluşturulan AC optimum güç akışı ve ortak enerji depolama sisteminin MILP modelinde hatlarda meydana gelen aktif güç kayıplarının minimize edilmesi amaçlanmıştır.

1.3 Hipotez

Ortak enerji depolama sistemlerinin şebekede yer alması ile gerçekleştirilecek uygulamalardaki hedefler arasında elektrik maliyetinin azaltılması, şebekeye gerilim, frekans desteği sağlaması, pik yükün azaltılması, yenilenebilir enerji kaynaklarının şebekeye entegre edilmesinin kolaylaştırılması sayılabilir. Akıllı şebeke yapısı içerisinde birçok amaç için kullanılacak ortak enerji depolama sistemlerinin büyük boyutlu enerji depolama sistemlerine ve küçük boyutlu bireysel enerji depolama sistemlerine göre birçok avantaj sağlayacağı ifade edilebilir.

Bu tez çalışması ile baralara ortak enerji depolama sistemlerinin yerleştirildiği bir elektrik güç şebekesinde aktif güç kayıplarının minimize edilmesi konusu araştırılacaktır. Literatürde ortak enerji depolama sistemlerinin ele alındığı çalışmalarda amaç fonksiyonlarının çoğunluğunun ekonomik açıdan kazanç elde edilmek olduğu görülmektedir. Bu çalışmada diğerlerinden farklı olarak şebeke kayıplarının minimize edilmesini hedefleyen bir amaç fonksiyonu belirlenmiştir. Ayrıca oluşturulan model akıllı şebeke konsepti içerisinde ileride yapılacak başka çalışmalar için (yenilenebilir enerji

kaynaklarının, talep cevabı uygulamalarının, elektrikli araçların eklenmesi vb.) kolayca genişletilebilir ve daha spesifik uygulamalara da uyarlanabilir.



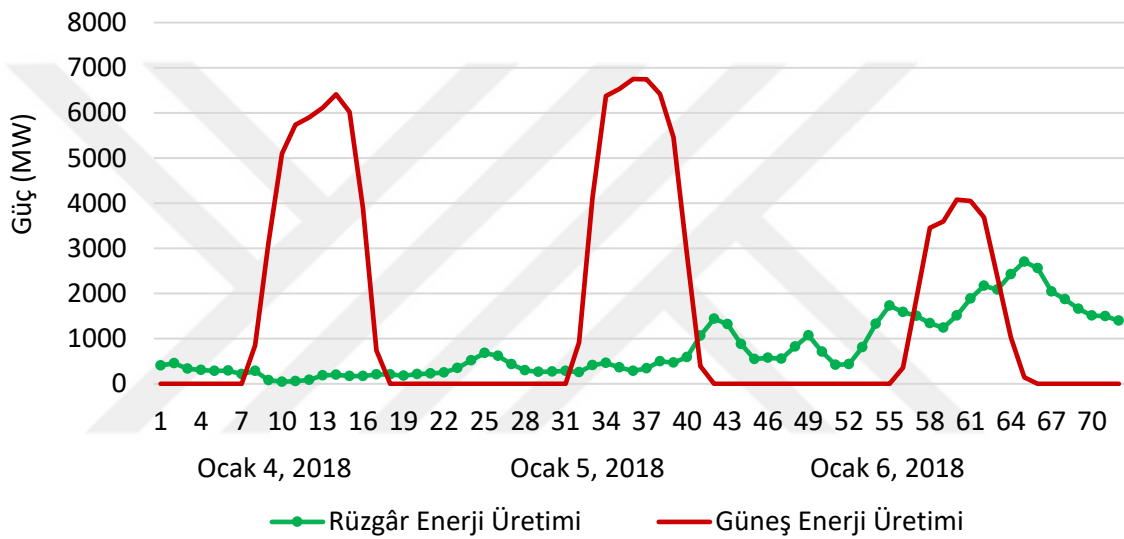
ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİ

Günümüzde kaliteli bir hayat sürdürebilmek için enerjiye her an ihtiyacımız vardır. Bu gereksinim ile enerjinin sınırsız, kesintisiz, sürdürülebilir, uygun fiyatlı, güvenilir, esnek olması ve çevreye zarar vermeden elde edilmesi istenmektedir. Ayrıca elektrik enerjisi birçok uygulamada en çok tercih edilen enerji şeklidir. Bu amaçla temiz, ucuz ve sürdürülebilir olması sebebiyle dünyada yenilenebilir enerji kaynaklarına bir yönelme vardır. Fakat bu sistemlerin güç sistemlerine entegrasyonu birtakım zorluklar yaşamaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının güç üretimlerinin tahmin edilmesinde yaşanan zorluklar ve bu kaynakların üretiminin stokastik olması nedeniyle enerji depolama sistemlerinin kullanılması zorunlu hale gelmektedir. Biyokütle haricinde yenilenebilir enerji kaynakları depo edilememektedir. Ayrıca elektrik üretim tesislerinin genellikle tüketim birimlerine uzak olması nedeniyle yaşanan enerji verimsizliği de enerji depolama sistemlerinin geliştirilmesini ve sisteme entegre edilmesini zorunlu kılmaktadır [23].

2.1 Enerji Depolama Sistemlerine Genel Bakış

Birçok ülke ve kuruluş tarafından yapılan gelecek kalkınma planlarında yenilenebilir enerji kaynakları yer almaktadır ve aynı zamanda bu kaynakların güç sistemlerine entegre edilmeleri ile oluşturacakları sorunların da altı çözülmektedir. Bu konuda güvenilirlik, sürdürülebilirlik ve maliyet açısından kaygılar mevcuttur. Çünkü yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen enerji kısa zamanda büyük değişim gösterebilmektedir. Şekil 2.1 'de Kaliforniya Bağımsız Sistem Operatörü'nden (California Independent System Operator – CAISO) alınan 04/01/2018 – 06/01/2018 tarihlerinde güneş ve rüzgâr

enerji kaynaklarından elde edilen saatlik ortalama güç bilgileri verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi rüzgâr ve güneş santrallerinin enerji üretimi saatlere göre büyük değişimler gösterebilmektedir. Özellikle güneş enerji santralleri güç talebinin fazla olmadığı saatlerde üretim yapmaktadır ve bunun sonucunda yenilenebilir enerji kaynakları verimli bir şekilde kullanılamamaktadır. Ayrıca rüzgâr enerji kaynaklarının güç üretiminde de kısa zamanda büyük değişimler olduğu görülmektedir. Bu durumlara bir çözüm olarak enerji depolama sistemleri güç sistemlerine dahil edilebilir. Enerji depolama sistemleri, yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen enerjinin enerji talebin çok olduğu saatlere kaydırılmasını sağlayabilmektedir [25].



Şekil 2. 1 CAISO rüzgâr ve güneş santralleri üretim verileri (04-06/01/2018)

Mevcut konvansiyonel güç sistemleri özellikle karbon emisyonları nedeniyle iklim değişikliğine bağlı olarak hem çevresel olumsuzlukları beraberinde getirmekte hem de bu konvansiyonel enerji kaynaklarının rezervlerinin yakın gelecekte biteceği tahmin edildiğinden yeni enerji üretim teknolojilerine yönelmeye ihtiyaç oluşturmaktadır. Bu amaçla gelişmiş ülkeler uyguladıkları politikalarla ve inceledikleri teknolojilerle enerjinin sürdürülebilir bir hale gelmesi için uğraşlar vermektedirler. Enerjinin sürdürülebilir bir hale gelmesi bu ülkeler açısından enerjinin güvenilir olmasını, çevrenin korunmasını ve beraberinde ekonomik kalkınmayı da getirecektir. Ülkelerin yaptığı kalkınma planlamalarında güç sistemlerinde enerji depolama sistemlerinin yer alması konusu da çok önemli bir yerdedir. Çünkü enerji depolama sistemleri elektrik şebekesi içerisinde özellikle yenilenebilir enerji kaynakları açısından çok önemli bir konumdadır ve daha

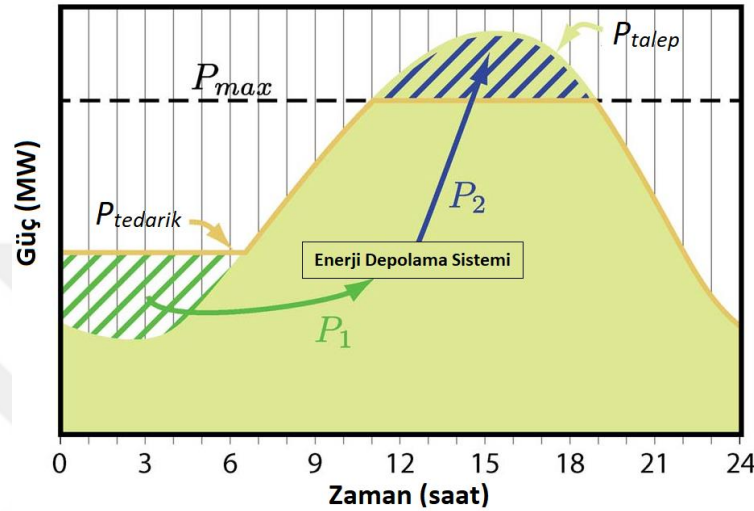
birçok uygulamada değerlendirilebilmektedir. Enerji depolama sistemlerinin elektrik şebekesinde kullanım alanları aşağıda belirtilmiştir:

- Yenilenebilir Enerji Kaynakları: Yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen enerji gün içerisinde değişen enerji talebine uyacak şekilde enerji depolama sistemlerinde depo edilebilir.
- Sistem Regülasyonu: Enerji depolama sistemleri enerji talebinin değişmesi nedeniyle kısa süreli yaşanan dalgalanmaları giderebilir ve anlık elektrik kesintilerinde sistem güvenilirliği sağlayabilir. Aynı zamanda gerilim çökmeleri, harmonik distorsiyonlar ve gerilim dalgalanmalarının giderilmesine yardımcı olabilir.
- Rezerv Kapasitesi Sağlama: Enerji sisteminde yaşanacak ani ve öngörülme-yen enerji taleplerinin karşılanmasına yardımcı olabilir, iletim hatlarında ya da üretim tesislerinde yaşanacak bir arıza durumunda sisteme enerji sağlayabilir.
- Pik Kesme: Enerji depolama sistemleri pik enerji talebi olan saatlerde sisteme enerji sağlayarak şebekeden çekilen pik enerjinin azaltılmasını sağlayabilir.
- Yük Dengeleme: Gün içerisinde özellikle enerji talebinin az olduğu saatlerde ve yenilenebilir enerji üretiminin fazla olduğu saatlerde fazla üretim enerji depolama sistemlerinde depo edilebilir ve pik saatlerde sisteme enerji enjekte edilebilir.

Bu tür uygulamalar başta ekonomik olmak üzere sistem operatörleri, elektrik şirketleri ve tüketicilere kazanç sağlamaktadır [23].

Yenilenebilir enerji kaynaklarının sayısının giderek artması ile yeni depolama alanları ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları, enerji üretim kapasitesi olarak büyük rüzgâr çiftlikleri ve güneş tarlaları gibi büyük ölçekli yenilenebilir tesisler hariç konvansiyonel elektrik tesislerinden küçüktürler ve bu kaynaklar bireysel konut, ofis, alışveriş merkezi, okul gibi birçok konuma dağıtık bir şekilde yayılmıştır. Bu dağıtık yapılar için kullanılacak enerji depolama sistemleri, tek bir konvansiyonel enerji tesisi için tahsis edilen depolama kapasitelerinden boyut olarak oldukça küçük olacaktır [23]. Ayrıca kurulum maliyetleri değerlendirildiğinde elektrik şirketlerinin büyük ölçekli enerji depolama sistemleri ile aynı görevi yapabilen küçük ölçekli enerji depolama sistemlerini tercih etmesi daha makul olacaktır.

Enerji depolama sistemlerinin elektrik güç sisteminde pik yükün azaltılmasına yardımcı olduğu uygulanmış birçok örnek mevcuttur. Şekil 2.2’de enerji depolama sisteminin şebekedeki pik yükü azalttığını gösteren bir örnek verilmiştir. Örnekte pik enerji talebi saatlerinde enerjinin bir kısmı enerji depolama sisteminden karşılanmaktadır. Bu durumda enerji depolama sisteminin kullanılması ile yük faktörü iyileştirilmiş ve pik enerji talebi önemli ölçüde azaltılmıştır.



Şekil 2. 2 Enerji depolama sisteminin pik enerji talebini azaltması [24]

Sahip oldukları özelliklere göre birçok farklı enerji depolama türü bulunmaktadır. Bunlar aşağıda belirtilmiştir:

2.1.1 Batarya Tabanlı Enerji Depolama Sistemleri

Bataryalar elektrokimyasal formda enerji depolamaktadırlar. Depolanan elektrokimyasal enerji elektriğe dönüştürüldüğünde DC bir gerilim elde edilmektedir. Bu nedenle AC bir şebekeye dahil edilebilmeleri için dönüştürücü bir elemana ihtiyaç duymaktadırlar. Dönüştürücü elemanlar genellikle yüksek verimlilik ve yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir. Fakat bu elemanların maliyetleri oldukça yüksektir. Lityum-İyon (Li-Ion), Sodyum-Sülfür (Na-S), Nikel-Kadmiyum (Ni-Cd), Metal-Hava, Çinko-Brom (Zn-Br), Kurşun-Asit bataryalar bu tür enerji depolama sistemlerini oluşturmaktadırlar [25]. Lityum-İyon bataryaların diğerlerine göre en önemli avantajı ağırlığına göre yüksek enerji yoğunluğuna sahip olması ve şarj ve deşarj durumlarında düşük enerji kayıplarına sahip olmasıdır. Yaklaşık olarak %100 verimliliğe sahiptirler. Fakat bu bataryaların kWh başına

yüksek kurulum maliyetleri vardır. Gelecekte bu birim fiyatların azalacağı tahmin edilmektedir. Bu bataryalar, elektrik şebekesine yerleştirilen enerji depolama sistemlerinde de en çok tercih edilen bataryalardan biridir. Bunun dışında dizüstü bilgisayarlarda, cep telefonlarında ve elektrikli araçlarda da kullanılmaktadırlar [24]. Sodyum-Sülfür bataryaların ise daha eski bir geçmişi vardır. Anlık olarak nominal güçlerinin altı katına kadar ani güç sağlayabilmektedirler. Yüksek güç ve enerji yoğunluğuna sahiptirler. Doğada bol ve ucuz olarak bulunan materyallerden üretilmektedirler. Bu bataryalar yaklaşık %85 verimliliğe sahiptir ve 300°-360° sıcaklıkta çalışmaktadır. Bu nedenle optimum performans için harici olarak ısıtılmalarına ihtiyaç vardır. Kurşun-Asit bataryaların geçmişi 1800'lü yılların ortalarına dayanmaktadır. Bu bataryalar aşırı deşarj edilirse ve bu konumda bekletilirse sülfat kristallerinin genişlemesinden dolayı tekrar şarj edilmesinde sıkıntılar yaşanmaktadır. Nikel-Kadmiyum bataryalar 1970 ve 1990 yıllarında yüksek performans gerektiren uygulamalarda kullanılmıştır. Son yıllarda bu bataryalar yerini Li-Ion bataryalara bırakmıştır. Bu bataryalar enerji yoğunluğu ve kullanım ömrü olarak Kurşun-Asit bataryalardan daha verimlidir [24], [25]. Daha birçok batarya türü de gerek araştırma ve geliştirme faaliyetleri, gerekse de ticari üretim açısından mevcuttur.

2.1.2 Sıkıştırılmış Hava Enerji Depolama Sistemleri

Sıkıştırılmış hava enerji depolama sistemlerinde hava, enerji kullanılarak yer altı mağaralarında sıkıştırılarak saklanmaktadır ve daha sonra enerji talebinin pik olduğu ya da elektrik fiyatının yüksek olduğu saatlerde bu sıkıştırılmış hava kullanılarak şebekeye enerji tedarik edilmektedir. Bu teknoloji büyük ölçekli bir depolama sistemidir. Bu depolama sistemlerinde havanın sıkıştırılması aşamasında ısı meydana gelmektedir. Elektrik üretimi sırasında türbinlerden geçen ısı miktarı elektrik üretimini doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle havanın depolanmasının yanında hava sıkıştırma aşamasında oluşan ısı da korunarak sistem verimliliği artırılabilir. Bu depolama sistemlerinin 1991 yılından beri Alabama'da ve 1978 yılından beri Almanya'da kullanılan örnekleri mevcuttur. Bu örneklerin tesis güçleri sırasıyla 110 MW ve 220 MW'tır [25].

2.1.3 Pompalanmış Su Enerji Depolama Sistemleri

Pompalanmış su enerji depolama sistemleri birkaç saatten birkaç güne kadar enerji sağlama kapasiteleri ile en yaygın olan ve en büyük ölçekli enerji depolama sistemleridir. Verimlilikleri %70-%85 aralığındadır [25]. Bu sistemlerde aralarında önemli yükseklik farkı olan iki su depolama havzası kullanılmaktadır. Örneğin gece enerji üretim kaynaklarında aşırı üretim meydana geldiğinde alt kotta yer alan havzadaki su üst kotta yer alan havzaya pompalanır. Daha sonra gün içerisinde enerji talebinin arttığı pik saatlerde bu süreç tersine işletilerek alt kota akan sudan elektrik üretimi gerçekleştirilir. Bir başka deyişle iki yönlü işletilebilen bir hidroelektrik santrale benzetilebilir. Bu işlem sırasında yaklaşık %70 verim elde edilmektedir. Aynı zamanda elektrik üretim süreci oldukça hızlı gerçekleştiği için elektrik şebekesinde ani talep değişimlerine hızlı cevap verebilmektedir. Fakat bu depolama sistemleri özellikle uygun arazi yapısının bulunmasında yaşanan sıkıntılar nedeniyle sınırlı bir yapıya sahiptir. Yapılan araştırmalara ve gerçekleştirilen uygulamalara göre MWh boyutunda bir enerji depolama için en uygun yöntemin bu olduğu söylenebilir [23].

2.1.4 Volanlar

Volanlarda enerji döner bir kütlede kinetik enerji şeklinde depo edilmektedir. Yüksek güç yoğunluğuna sahiptirler ve kullanım ömrü olarak şarj ve deşarj sayıları çok fazladır. Hızlı şarj ve deşarj olabilme özellikleri vardır. Uzun ömürleri olduğu için ulaşım ve güç elektroniği uygulamalarında tercih edilmektedirler. Bu sistemlerde şarj durumu, hız ve eylemsizlik kolay bir şekilde ölçülerek izlenebilmektedir. Diğer depolama sistemlerine göre nispeten daha az yer kaplamaktadırlar ve bakım masrafları da azdır. ABD Enerji Bakanlığı (Department of Energy – DOE) volanların geliştirilmesi için şirketlere ekonomik destekler sunmaktadır. Gelecekte bu depolama sistemlerinde umut verici gelişmelerin olması tahmin edilmektedir [25].

2.1.5 Süperkapasitörler

Süperkapasitörler bataryalar ile karşılaştırıldığında daha az enerji yoğunluğuna sahiptirler ancak yüksek güç yoğunlukları sayesinde sisteme çok hızlı bir şekilde güç sağlayabilmektedirler. Ekonomik açıdan Kurşun-Asit bataryalar ile karşılaştırmaları

yapılsa da birçok üstünlükleri mevcuttur. Hareketli parçaları yoktur, düşük sıcaklıklarda bile iyi performans sergileyebilmektedirler. Bakım gerektirmezler ve ömürlerinde azalma olmadan binlerce kez hızlı şarj ve deşarj olabilmektedirler [25].

2.1.6 Hidrojen Tabanlı Enerji Depolama Sistemleri

Hidrojen enerjisi için ana bileşen olan yakıt hücreleri düşük doğru gerilim (DC) üreten elektrokimyasal cihazlardır. Yakıt olarak genellikle saf hidrojen kullanılmaktadır. Bu cihazların bataryalardan farkı elektrik enerjisini depolamamaları ve yakıt olan hidrojenin depolanmasıdır. Hidrojen yakıt hücresinin negatif elektrotunu, hava ya da oksijen de pozitif elektrotunu beslemektedir. Elektrokimyasal reaksiyonun sonucunda elektrik üretilmektedir ve su ortaya çıkmaktadır. Bu sistemlerde konvansiyonel elektrik üretim tesislerinde olduğu gibi çevreye zarar veren gazlar ortaya çıkmamaktadır, meydana gelen tek atık sudur [23]. Yakıt Hücrelerinin Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücresi (Proton Exchange Membrane Fuel Cell – PEMFC), Alkali Yakıt Hücresi (Alkaline Fuel Cell – AFC), Fosforik Asit Yakıt Hücresi (Phosphoric Acid Fuel Cell – PAFC), Eriyik Karbonatlı Yakıt Hücresi (Molten Carbonate Fuel Cell – MCFC), Katı Oksit Yakıt Hücresi (Solid Oxide Fuel Cell – SOFC), Doğrudan Metanol Yakıt Hücresi (Direct Methanol Fuel Cell – DMFC) vb. türleri bulunmaktadır. Bir elektrolizör ünitesi, bir hidrojen tankı ve bir yakıt hücresi biriminin beraberce kullanıldığı yapılar hidrojen tabanlı enerji depolama sistemleri olarak da tanımlanmaktadır.

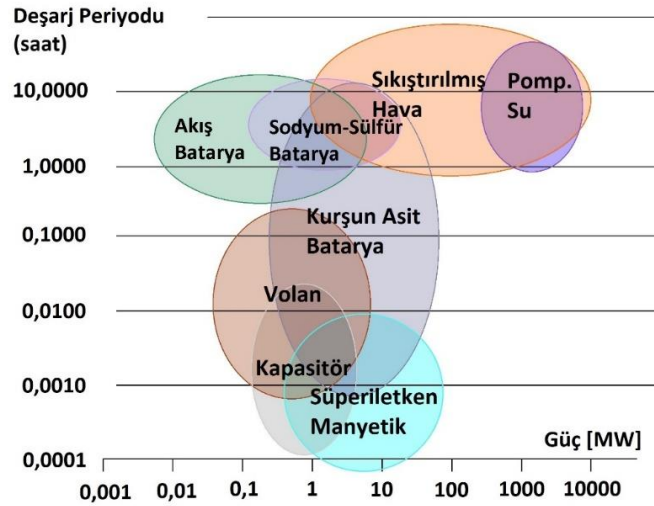
2.1.7 Akış Bataryalar

Akış bataryalarda enerji harici bir tankın içerisinde sıvı çözeltilerde depolanmaktadır. Bu açıdan bu enerji depolama sistemleri yakıt hücrelerine benzemektedir. Bu depolama sistemlerinde depolama kapasitesi tankın hacmine bağlıyken, anma gücü reaktörün boyutuna bağlıdır. Uzun bir kullanım ömrüne ve iyi bir enerji kapasitesine sahiptirler. Düşük işletim sıcaklıkları vardır. Özellikle rüzgâr ve güneş gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının stokastik enerji üretimi durumu için umut verici bir teknolojidirler. Enerji verimlilikleri %75-%85 aralığındadır. Birkaç kWh'den birkaç on kWh'e kadar üretimleri mevcuttur. Gelecekte kapasitelerinin daha da artması beklenmektedir. Bu bataryalar üç

türe ayrılmaktadır. Bunlar: indirgeme oksidasyon bataryalar, hibrit bataryalar ve redoks yakıt hücreleridir [23], [25].

2.1.8 Süperiletken Manyetik Enerji Depolama Sistemleri

Süperiletkenlik 1911 yılında keşfedilmesine rağmen bu yapının bir enerji depolama sistemi olarak kullanılması 1970'li yıllarda gerçekleşmiştir. Süperiletken manyetik enerji depolaması, enerjinin bir süperiletken bobinin içinden akan doğru akımın yarattığı manyetik alanda depolanmasına dayanmaktadır. Bobin süperiletken kritik sıcaklığının altında bir sıcaklıkta tutulmaktadır. Bu yapıların en önemli avantajları diğer enerji depolama sistemleri de dahil olmak üzere en yüksek enerji yoğunluklarına sahip olmaları, yaklaşık %90 verimlilikleri ve şarj ve deşarj sırasında gecikmelerinin çok az olmasıdır. Fakat diğer enerji depolama sistemleri ile karşılaştırıldığında bu depolama sistemlerinin soğutma için duyduğu enerji gereksinimleri ve süperiletken kabloların yüksek maliyetleri nedeniyle günümüzde küçük ölçekli enerji depolamaları için kullanılmaktadırlar. Bu nedenle bu yapılar en çok güç kalitesi uygulamalarında değerlendirilmektedir. Dünyada bu konuyla ilgili kurulu ve gerçekleşmekte olan birçok süperiletken manyetik enerji depolama sistemi uygulaması bulunmaktadır [24]-[26].



Şekil 2. 3 Depolama teknolojilerinin karşılaştırılması [24]

2.1.9 Araçtan Şebekeye Enerji Depolama Sistemleri (Vehicle to Grid – V2G)

Araçtan şebekeye (Vehicle to Grid – V2G) enerji konsepti, elektrikli araçların park konumunda olduğu durumda elektrikli araç ile elektrik şebekesinin iletişim kurup

araçtan elektrik şebekesine enerjinin aktarıldığı bir talep cevabı yapısıdır. Bu yapı, elektrik şebekesinde pik enerji talebinin karşılanması ve yardımcı hizmetlerin sağlanması için kullanılabilir. Ayrıca yenilenebilir enerji kaynaklarının şebekeye entegre edilmesiyle yaşanan sorunların giderilmesine de katkıda bulunabilmektedir. Bu konseptte dahil olan araç sayısı arttıkça şebekede gerçekleştirilecek talep cevabı olaylarında toplanan büyük kapasiteler ile güvenilirlik daha iyi sağlanacaktır. Ayrıca bu yapıda gelişmiş kontrol ve haberleşme altyapısına da ihtiyaç vardır. Araçtan şebekeye enerji yapısının verimliliği ise doğrudan araçta yer alan bataryaya bağlıdır [24], [25].

Çizelge 2. 1 Çeşitli enerji depolama sistemlerinin karşılaştırılması [25], [27]

| Depolama Teknolojisi | Avantajları | Dezavantajları | Kullanım Alanları |
|---|---|--|---|
| Pompalanmış Su | Yüksek kapasite, düşük maliyet | Uygun arazi yapısı | Büyük ölçekli yenilenebilir enerji sistemleri |
| Sıkıştırılmış Hava | Yüksek kapasite, düşük maliyet | Uygun depolama alanı | Büyük ölçekli yenilenebilir enerji sistemleri |
| Bataryalar | Yüksek güç, enerji yoğunluğu ve verimlilik | Yüksek maliyet (Li-lon vb.), düşük ekonomik ömür | Yenilenebilir enerji kaynakları, taşınabilir cihazlar, elektrikli araçlar |
| Volan | Yüksek güç yoğunluğu | Düşük enerji yoğunluğu | Yenilenebilir enerji kaynakları, elektrikli araçlar, uzay uygulamaları |
| Süperiletken Manyetik | Yüksek güç yoğunluğu | Düşük enerji yoğunluğu, yüksek maliyet | Güç kalitesi uygulamaları |
| Süperkapasitör | Uzun ekonomik ömür, yüksek verim | Düşük enerji yoğunluğu | Elektrikli araçlar |
| Hidrojen Tabanlı Enerji Depolama Sistemleri | Yüksek verimlilik, yüksek güvenilirlik, hızlı enerji dönüşümü | Yüksek edinim maliyeti | Evsel ve endüstriyel alanlar |

Depolama sisteminin seçiminde depolama kapasitesi, fiziksel olarak boyutlandırma, ağırlık, maliyet, ekonomik ömür vb. özellikler dikkate alınarak bir seçim yapılmalıdır. Gerçekleştirilecek uygulamaya göre enerji depolama sistemi türünün ve boyutunun doğru seçilmesi çok önemli bir konudur. Çeşitli enerji depolama sistemlerinin Çizelge 2.1 ve Şekil 2.3'te karşılaştırması yapılmıştır. Bu verilerden pompalanmış su tabanlı enerji depolama sistemleri, sıkıştırılmış hava enerji depolama sistemleri ve sodyum-sülfür bataryaların en yüksek deşarj sürelerine, yüksek verimliliklere ve uzun ekonomik ömürlere sahip oldukları görülmektedir. Bu benzer özellikleriyle beraber bu depolama sistemlerinin maliyetleri de birbirine yakındır. Enerji depolama sistemleri kapasiteleri açısından karşılaştırıldığında en uygun enerji depolama sistemlerinin pompalanmış su tabanlı enerji depolama sistemi ve sıkıştırılmış hava enerji depolama sistemi olduğu söylenebilir [25].

Çizelge 2. 2 Dünyada en büyük değerlere sahip depolama sistemlerinden örnekler

| Yer | Depolama Sistemi Teknik Özellikler | Enerji Depolama Tipi |
|---|------------------------------------|----------------------|
| ABD / Virginia / Warm Springs / George Washington National Forest | 3,003 GW / 30,9309 GWh | Pompalanmış Su |
| ABD / Michigan / Ludington | 1,872 GW / 17,976 GWh | Pompalanmış Su |
| ABD / Texas / Tennessee Colony | 317 MW / 30,432 GWh | Sıkıştırılmış Hava |
| İspanya /Valencia/Cortes-La Muela | 2 GW / 36 GWh | Pompalanmış Su |
| Japonya/Hyogo/Asago/Kurokawa Reservoir | 1,932 GW / 15,456 GWh | Pompalanmış Su |

Dünyada birçok ülkede yer alan depolama sistemlerine bakıldığında ise, bu sistemlerinin çoğunluğunu sıkıştırılmış hava enerji depolama sistemleri ve pompalanmış su enerji depolama sistemlerinin oluşturduğu görülmektedir. Bu depolama sistemlerinin dünyadaki en büyük değerlere sahip önemli örneklerinden bazıları Çizelge 2.2' de verilmiştir. Konuya küçük ölçekli enerji depolama sistemlerinin bireysel kullanımı açısından bakıldığında ise bunların yüksek edinim, işletim ve bakım maliyetleri nedeni ile

ekonomik olmadıkları görülmektedir. Bu konuya ekonomik açıdan daha makul olan ortak enerji depolama sistemleri bir çözüm oluşturabilir. Çünkü ortak enerji depolama sistemleri birden çok tüketiciye hizmet etmektedir ve kurulum maliyeleri daha düşüktür. Aynı zamanda büyük ölçekli enerji depolama sistemlerinin yaptığı hizmetleri de yapabilmektedirler.

2.2 Ortak Enerji Depolama Sistemleri

Ortak bir enerji depolama sistemi yapısı genellikle Lityum-iyon olarak tercih edilen bir batarya, bir güç dönüştürücü sistem ve bir ölçme ve kontrol sisteminden oluşmaktadır. IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) ortak enerji depolama sistemlerini *“birkaç evsel tüketici ya da küçük ölçekli ticari tüketicilere hizmet eden bölgesel gerilim regülasyonu, pik yükün azaltılması vb. uygulamalar için transformatörün sekonderine bağlı küçük dağıtık enerji depolama birimi”* olarak tarif etmektedir [9]. Bir ortak enerji depolama biriminin nominal gücü çoğunlukla 25 kW ile 50 kW arasında değişmektedir. Enerji kapasitesi ise 75 kWh ve 150 kWh arasındadır. Yani bir ortak enerji depolama birimi 1 ile 3 saat arasında sisteme enerji sağlayabilmektedir. Ortak enerji depolama sisteminin üç çalışma modu vardır. Bunlar; bekleme modu, şarj modu ve deşarj modudur. Şarj modunda enerji depolama sistemi şarj olmaktadır. Deşarj modunda enerji depolama sistemi şebekeye enerji enjekte etmektedir. Bekleme modunda ise enerji depolama sistemi şarj ya da deşarj olmamakta, gelecek bir şarj ya da deşarj sinyalini beklemektedir [28].

Ortak enerji depolama sistemi konseptine bakıldığına bahsi geçen uygulama dünyada yeni gelişen bir oluşumdur. Bu kavram, araştırmacılar ve elektrik şirketleri tarafından halen araştırılmaktadır. Gerçekleştirilen çalışmalar da genellikle teknolojik yetersizlik nedeniyle sınırlıdır [5]. Fakat bu duruma rağmen, dünyada ortak enerji depolama sistemlerinin şebekedeki pik yükü azaltmak için kullanıldığı birçok uygulanmış örnek mevcuttur. Bu örnekler Çizelge 2.3'te verilmiştir.

Ortak enerji depolama sistemi transformatörün sekonderine bağlanarak sisteme entegre edilmektedir ve kontrolü güvenlik açısından acil durumların dışında uzaktan gerçekleştirilmektedir. Tüketiciler, ortak enerji depolama sisteminin yük tarafındaki baraya bağlı durumdadırlar. Bir barada bir ortak enerji depolama sistemi yer alabildiği

gibi birden çok ortak enerji depolama sistemi de yer alabilmektedir. Ayrıca farklı konumlarda yer alsalar bile bir kontrolör ile koordine edilerek aynı göreve hizmet etmek için bir araya da getirilebilmektedirler [29]. American Electric Power (AEP) şirketi tarafından Ohio'da birden çok ortak enerji depolama sisteminin birlikte kullanılması ile Ohio GridSmart Projesi gerçekleştirilmiştir. Bu projede 1742 tüketicinin yer aldığı, 13,2 kV'luk ve pik yükün 6,3 MVA olduğu bir dağıtım şebekesinde 80 adet 25 kWh'lik üniteden oluşan bir ortak enerji depolama sistemi yapısı kurulmuştur [30].

Çizelge 2. 3 Ortak enerji depolama sistemlerinin pik yükü azaltmak için uygulandığı örnekler

| Ülke / Yer | Depolama Sistemi Teknik Özellikler | Enerji Depolama Tipi |
|---|------------------------------------|------------------------|
| ABD / North Carolina / Charlotte | 50 kW / 50 kWh | Lityum Polimer Batarya |
| ABD / Kaliforniya / San Diego/ Horton Plaza | 36 kW / 144 kWh | Lityum – İyon Batarya |
| ABD / Kaliforniya / Lancaster / Lancaster Blvd | 30 kW / 30 kWh | Lityum – İyon Batarya |
| ABD / Kaliforniya / Oakland / East 8th Street | 30 kW / 30 kWh | Lityum – İyon Batarya |
| ABD / Kaliforniya / Oakland / Fallon Street | 30 kW / 30 kWh | Lityum – İyon Batarya |
| ABD / Kaliforniya / Oakland / Campus Drive | 30 kW / 30 kWh | Lityum – İyon Batarya |
| ABD / Kaliforniya / Redwood City / Marshall Street | 30 kW / 30 kWh | Lityum – İyon Batarya |
| ABD / Kaliforniya / Redwood City / Marine Parkway | 30 kW / 30 kWh | Lityum – İyon Batarya |
| ABD / Kaliforniya / Carlsbad / Palomar Airport Road | 30 kW / 30 kWh | Lityum – İyon Batarya |
| ABD / Kaliforniya / Sacramento | 153 kW / 400 kWh | Lityum Polimer Batarya |

Çizelge 2. 3 Ortak enerji depolama sistemlerinin pik yükü azaltmak için uygulandığı örnekler (devamı)

| | | |
|---|------------------|------------------------|
| ABD / Michigan / Monroe | 500 kW / 1 MWh | Lityum – İyon Batarya |
| ABD / Kaliforniya / Commerce / Garfield Ave. | 90 kW / 30 kWh | Lityum Polimer Batarya |
| ABD / Ohio / Columbus / Riverside Plaza | 100 kW / 100 kWh | Lityum – İyon Batarya |
| ABD / Kaliforniya / City of Commerce | 500 kW / 250 kWh | Lityum – İyon Batarya |
| ABD / Michigan / Monroe / Raisinville Rd. | 500 kW / 250 kWh | Lityum – İyon Batarya |
| ABD / Kaliforniya / Oak Park / Satinwood Road | 60 kW / 120 kWh | Lityum – İyon Batarya |
| ABD / Kaliforniya / Solvang / State College Boulevard | 30 kW / 30 kWh | Lityum – İyon Batarya |
| ABD / Kaliforniya / San Rafael / Montecillo Road | 30 kW / 30 kWh | Lityum – İyon Batarya |
| ABD / Kaliforniya / Norwalk / Firestone Boulevard | 30 kW / 30 kWh | Lityum – İyon Batarya |
| ABD / Kaliforniya / San Diego / Convoy St | 30 kW / 30 kWh | Lityum – İyon Batarya |
| ABD / Kaliforniya / San Diego / Garnet Ave | 30 kW / 30 kWh | Lityum – İyon Batarya |
| ABD / Kaliforniya 92111 / San Diego | 25 kW / 50 kWh | Lityum – İyon Batarya |
| ABD / Kaliforniya 92108 / San Diego | 25 kW / 50 kWh | Lityum – İyon Batarya |
| ABD / Hawaii / Honolulu / Nimitz Hwy | 36 kW / 72 kWh | Lityum – İyon Batarya |
| ABD / Kaliforniya / Playa Vista | 30 kW / 30 kWh | Lityum – İyon Batarya |
| ABD / Kaliforniya / Aliso Viejo / Journey | 30 kW / 30 kWh | Lityum – İyon Batarya |
| ABD / Kaliforniya / Fullerton / State College Boulevard | 480 kW / 480 kWh | Lityum – İyon Batarya |
| ABD / Kaliforniya / Santa Cruz / Ocean Street | 90 kW / 180 kWh | Lityum – İyon Batarya |

Çizelge 2. 3 Ortak enerji depolama sistemlerinin pik yükü azaltmak için uygulandığı örnekler (devamı)

| | | |
|--|------------------|---------------------------------|
| ABD / Kaliforniya / Mountain View / Truman Ave | 200 kW / 400 kWh | Lityum – İyon Batarya |
| ABD / Kaliforniya / Mountain View / Bayshore Parkway | 100 kW / 233 kWh | Lityum – Demir – Fosfat Batarya |
| ABD / North Carolina 28673 Sherrills Ford / Marshall Steam Station | 250 kW / 750 kWh | Lityum Polimer Batarya |
| ABD / Nevada / Las vegas / Sahara Ave | 5 kW / 10 kWh | Lityum – İyon Batarya |
| ABD / Kaliforniya / Los Altos / Almond Ave | 200 kW / 400 kWh | Lityum – İyon Batarya |
| ABD / New York / Yonkers | 96 kW / 96 kWh | Lityum – İyon Batarya |
| ABD / Kaliforniya / Santa Barbara / Anapamu Street | 30 kW / 30 kWh | Lityum – İyon Batarya |
| ABD / Kaliforniya / Borrego Springs | 75 kW / 150 kWh | Lityum Polimer Batarya |
| ABD / Kaliforniya / Rancho Cordova / Anatlia Village | 90 kW / 90 kWh | Lityum – İyon Batarya |
| Almanya / Bavaria / Schwabmuenchen | 75 kW / 150 kWh | Kurşun – Asit Batarya |
| Avustralya / NSW / Dorrigo / Tyringham Rd | 60 kW / 72 kWh | Kurşun – Asit Batarya |
| Avustralya / New South Wales / Mayfield West / Murray Dwyer Circuit / CSIRO Energy Center | 150 kW / 112 kWh | Kurşun – Asit Batarya |
| Avustralya / Western Australia / Busselton / Chapman Hill Road | 10 kW / 100 kWh | Vanadyum Redoks Akış Batarya |
| Birleşik Krallık / Berkshire SL1 2 TW / Slough / West Berkshire / Slough / Chalvey / 135 High St | 75 kW / 75 kWh | Lityum – İyon batarya |
| Güney Kore / Gyeongnam / Changwon | 250 kW/ 425 kWh | Lityum – Polimer Batarya |

Bir ortak enerji depolama sistemi şebekeye büyük ölçekli bir depolama sistemi kadar faydalı olabilmektedir. Elektrik şirketleri büyük ölçekli enerji depolama sistemlerinin kurulum maliyetlerinden kurtulmak için çok daha düşük maliyetli olan küçük boyutlu ortak enerji depolama sistemlerini güç sistemlerinde kullanabilirler [18]. Fakat büyük ölçekli depolama sistemlerine kıyasla daha ekonomik olmalarına rağmen, ortak enerji depolama sistemlerinin gelişmesindeki en büyük engellerden biri yine bu sistemlerin de yüksek maliyetleridir. Özellikle Lityum-İyon tercih edilen bataryanın maliyeti yüksektir. Lityum-İyon bataryaların, kontrol ve haberleşmeyi sağlayan sistemlerin gelecekte maliyetlerinin azalacağı tahmin edildiğinden bu sistemlerin kurulum maliyetleri düşecek ve elde edilen ekonomik kâr artacaktır [19]. Günümüzde ise yüksek maliyetlerle kurulan bu tesislerin şebekede birden çok uygulamada kullanılması ile bu sistemlerden elde edilecek kârın maksimum seviyeye çekilmesi hedeflenmelidir. Bir ortak enerji depolama sistemi, gerçekleştirilen uygulamaya göre birden çok amaç için kullanılabilir. Bu hedefleri şebeke açısından ve bölgesel açıdan uygulamalar olarak ayırabiliriz.

Şebeke Uygulamaları:

- Pik kesme: Şebekede pik yük talebinin arttığı periyotlarda transformatörün ve hatların yükünün azaltılması amacıyla, ortak enerji depolama sistemi enerji talebinin düşük olduğu periyotlarda şarj olmaktadır ve enerji talebinin arttığı periyotlarda sisteme enerji sağlamaktadır.
- Yan hizmetler: Birden çok ortak enerji depolama sistemi bir kontrolör yardımı ile koordine edilerek elde edilen kapasite frekans düzenleme ve yük takibi uygulamalarında kullanılmaktadır.

Bölgesel Uygulamalar:

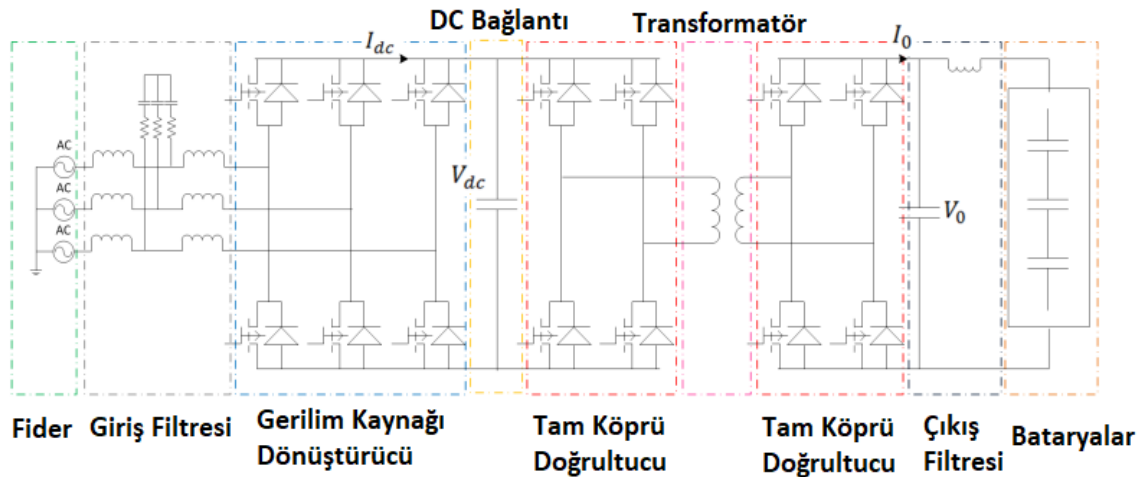
- Şebekeden bağımsız çalışma/yedek güç: Ortak enerji depolama sistemleri şebekede meydana gelen bir arıza durumunda şebekeden bağımsız olarak 1-2 saatlik enerji sağlayabilmektedirler.
- Yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu: Evsel tüketicilerin çatılarında yer alan PV güç üretim kaynakları ve küçük ölçekli rüzgâr türbinleri tabanlı üretilen değişken gücü yöneterek şebekeye entegrasyonlarını kolaylaştırmaktadırlar.

- Gerilim desteği: Ortak enerji depolama sisteminin içerisinde yer alan g dönüştürücü sistem ile aktif gücün yanında reaktif gücü de elde edilebilmektedir. Bu sistem, gerilim seviyesinin iyileştirilmesi için istenildiğinde gücü faktörünü ayarlayabilmektedir. Dalgalı bir yapıya sahip olmayan gerilim profili, sistem verimliliğinin artmasına yardımcı olacaktır. Ayrıca sistemde yer alan hassas yüklerin korunması adına güvenilirlik ve gücü kalitesi de arttırılmış olacaktır [19].

Günümüzde yüklerin hizmet kalitesi açısından daha yüksek güvenilirlik istemesi ve özellikle elektrikli araçların sayısının giderek artması ile bu araçların şarj olurken oluşturdukları pik talepler, akıllı şebeke yapısı içerisinde yer alan enerji depolama sistemlerinden biri olan ve büyük ölçekli sistemlere göre de birçok avantajı olan ortak enerji depolama sistemlerine gereksinimi arttırmaktadır. Ortak enerji depolama sistemlerinde yer alan gücü elektroniği elemanları, gerilim seviyesini ve gücü kalitesini korumak için sisteme aktif gücü sağlamanın yanında anlık olarak cevap verebilen kompanzasyon sistemleri gibi de hizmet verebilmektedirler. Çünkü sistemdeki aktif ve reaktif gücü talepleri anlık olarak değişmektedir. Ayrıca güneş ve rüzgâr enerji üretim kaynaklarının da gerilim ve gücü seviyelerinde anlık olarak değişimler görülebilmektedir. Ortak enerji depolama sistemleri, şebekedeki bu değişimlere hızlı bir şekilde cevap vererek gücü kalitesinin arttırılmasına yardımcı olabilmektedir [17].

Ortak enerji depolama sistemi nitesi incelendiğinde kablo bağlantı terminalleri, izolasyon kontaktörleri, batarya yönetim sistemi, gücü dönüştürücü eleman ve batarya yer almaktadır. Bir ortak enerji depolama sisteminin verimliliği, barındırdığı bataryanın ve gücü dönüştürücü sistemin verimliliğine bağlıdır. Bu durum sistem verimliliğini ve kayıpları doğrudan etkileyecektir. Ortak enerji depolama sisteminin giriş modülünde şebekeden AC giriş ile birlikte rneğin PV gücü üretiminden elde edilen DC gücün de depo edilebilmesi açısından bir DC giriş de yer alabilir [29]. Ayrıca ortak enerji depolama sisteminin diğer birimler ile iletişim kurmasını sağlayacak bir haberleşme birimi de yer almaktadır. Ortak enerji depolama sistemi kontrolörünün ortak enerji depolama sistemleri, şebeke, iletim sistem operatörü ve dağıtım sistem operatörü ile yapacakları bu haberleşmede gerçekleştirilen uygulamaya uygun olarak kablolu veya kablosuz haberleşme teknolojileri seçilebilir. Kablosuz haberleşme teknolojisine bakıldığında kablo maliyetlerinden kaçınılması, düşük ilk yatırım maliyeti, son noktalardaki esnekliği,

kablolanmanın zor yapılabildiği alanlarda kolaylık sağlaması gibi özellikleri avantaj olarak sayılabilirken, bilgi sinyalinin gönderimi sırasında meydana gelen kayıplar nedeniyle sinyalin etki alanında bir daralma meydana gelmesi dezavantaj oluşturmaktadır. Ayrıca kablosuz haberleşme teknolojilerinde yetkisiz kişilerin engellenmesi açısından bir güvenlik problemi de yer almaktadır ve bu açıdan güvenlik özelliklerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Kablosuz haberleşme teknolojileri ZigBee, Z-Wave, Wi-Fi, Wi-Max, bilişsel radyo ve yeni hücreli teknolojiler olarak sayılabilir. Kablolulu haberleşme teknolojilerinde ise güç iletim sistemi veya bu iletim hattı dışında bir kablo kullanılmaktadır. Bu teknolojiye örnek olarak güç hattı iletimi (Power Line Communication-PLC), Fiber-Optics ve Ethernet verilebilir. Farklı özelliklere sahip bu iki haberleşme teknolojisinin kullanım yerine göre birbirlerine üstünlükleri mevcuttur. Bu nedenle uygun haberleşme hattı belirlenirken hangi haberleşme teknolojisinin uygulanabilir olduğu iyi analiz edilerek belirlenmelidir. Ayrıca veri sinyalinin gönderiminde uygun bant genişliği ve düşük gecikme süresine de dikkat edilmelidir. Gecikme süresi, ortak enerji depolama sistemine bir sinyalin gönderilme zamanı ile bu sinyalin alındığı zaman arasındaki gecikmeyi ifade etmektedir. Bant genişliği ise bilgi sinyallerinin veri aktarım hızını belirtmektedir. Bu iki tanım uygulamaların hızlı ve etkili bir şekilde gerçekleştirilmesi açısından önemlidir [31].



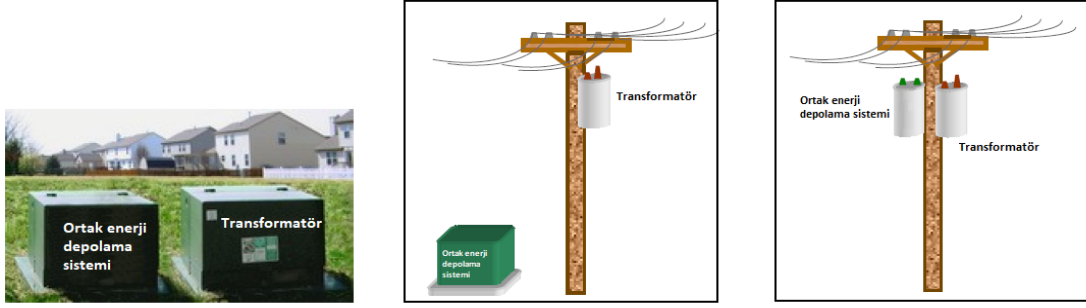
Şekil 2. 5 Ortak enerji depolama sisteminin güç dönüştürücü sistemi [28]

Ortak enerji depolama sistemi ünitesinde yer alan güç dönüştürücü sistemler için birçok yeni gelişmiş teknoloji mevcuttur. Bu eleman için dört bölgeli çalışan quadrant inverter tercih edildiği durumda ortak enerji depolama sistemi şebeke ile tamamen aktif veya

reaktif güç alışverişi yapabilmektedir. Şebeke ile aktif ve reaktif güç alışverişi yapabilme yeteneği ortak enerji depolama sisteminin gerilim, frekans ve reaktif güç kontrolü yapabileceğini göstermektedir. Güç dönüştürücü sistemin yapısı ise şu elemanlardan oluşmaktadır: girişinde harmonik bir filtre ve bu filtreye bağlı gerilim kaynağını dönüştürücü bir eleman yer almaktadır. Gerilim seviyesi, her iki tarafında da tam köprü dönüştürücü sisteme bağlı bir yüksek frekanslı transformatör ile gerçekleştirilmektedir. Bu transformatör ortak enerji depolama sisteminin gerilim ve akım seviyesini düzenlemektedir. Depolama biriminde DC gerilim seviyesi bir kapasitör ile sabit tutulmaktadır ve bunun için Uzay Vektör Modülasyon (Space Vector Modulation) yöntemi kullanılmaktadır. Ortak enerji depolama sistemi için bir güç dönüştürücü sistemin yapısı Şekil 2.5'te görülmektedir [28].

Ortak enerji depolama sistemlerinin yerleştirileceği yerin belirlenmesi de çok önemli bir konudur. Çünkü yer belirlenirken genellikle sınırlı bir alan ile karşılaşılmaktadır. Bu açıdan planlama yapılırken uygulanabilirliğe dikkat edilmelidir. Ayrıca dikkat edilmesi gereken diğer konular ise personelin depolama ünitesine kolay erişim sağlayabilmesi, estetik açıdan çevreye güzel gözükecek tasarımların ve planlamaların yapılmasıdır [19]. Ayrıca ortak enerji depolama sistemleri transformatörlerin yanına konumlandırıldığı için mevcut transformatörün durumuna göre (direk tipi, bina tipi) farklı şekillerde de sisteme dahil edilebilmektedirler. Örneğin, evsel bir bölgeye hizmet eden bir bina tipi transformatörün yanında bina tipi bir depolama sistemi kullanılabilir. Ayrıca direk tipi transformatörlerin olduğu bazı uygulamalarda ortak enerji depolama sistemi ihtiyaç durumuna göre direk tipi ya da bina tipi seçilebilir. Şekil 2.6'da bu yapıdaki örnekler görülmektedir. eCAMION şirketi tarafından Ağustos 2016'da Ryerson Üniversitesi ve Toronto Hydro ortaklığında Toronto'da dünyadaki ilk direk tipi ortak enerji depolama sistemi kurulmuştur. Ortak enerji depolama sistemleri Ryerson Üniversitesi tarafından geliştirilen akıllı bir yönetim sistemi vasıtasıyla çalıştırılmaktadır ve konutlarda yer alan akıllı sayaçlarla iletişim halindedirler. Burada kullanılan her bir ortak enerji depolama sistemi 25 kW/16 kWh değerlerine sahiptir ve -20°C ile +60°C ortam sıcaklığında çalışabilmektedir. İlgili ülkenin Enerji Bakanlığı tarafından da hem ortak enerji depolama sistemi hem de akıllı şebekelerin gelişimi için 50 Milyon \$ destek sağlanmıştır. Şu anda pilot aşamada olan çalışmalar devam etmektedir ve başarı yakalandığı takdirde şehir

genelinde yeni direk tipi ortak enerji depolama sistemlerinin kurulması ve bunun bir standart haline getirilmesi planlanmaktadır. Bu şirket ortak enerji depolama sistemleri ile ilgili gerçekleştirdiği ilk bina tipi projesinde 500 kW/250 kWh değerindeki bir üniteyi Kanada/North York/Roding Arena and Community Centre bölgesine kurmuştur. Bu ortak enerji depolama sistemi aynı zamanda 75 kW değerindeki bir PV güç üretim kaynağına da bağlıdır [32].



a) Bina tipi transformatör ve ortak enerji depolama sistemi

b) Direk tip transformatör ve bina tipi ortak enerji depolama sistemi

c) Direk tip transformatör ve ortak enerji depolama sistemi

Şekil 2. 6 Ortak enerji depolama sistemi ve transformatörün birlikte kullanımı [29]

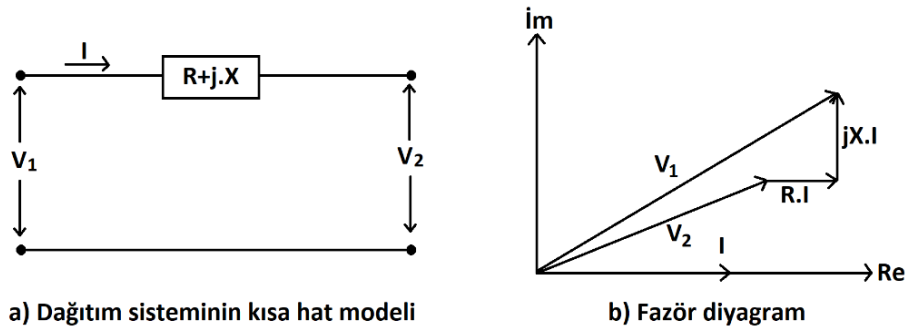
Güvenlik açısından bakıldığında ortak enerji depolama sisteminden önce ve sonra devreyi kesen sigortalı bir kesici eleman yerleştirilmelidir. Bu kesici bir arıza durumunda ortak enerji depolama sisteminin arızadan yalıtılmasını sağlayacaktır. Bu eleman gerekirse manuel olarak da kontrol edilebilmelidir. Ayrıca depolama sistemi üzerinde acil durdurma butonu da yer almalıdır [19].

SUNULAN SİSTEMİN MATEMATİKSEL MODELLEMESİ

3.1 Güç Akışı Analizi

Güç akışı analizi bir sistemde kısa devre, harmonik, koruma, kararlılık ve diğer analizlerin yapılabilmesi için gerekli ilk analizdir. Bu analiz ile dengeli ve kararlı üç fazlı sistemlerde baraların gerilimleri, hatlarda meydana gelen kayıplar ve hatlardaki aktif ve reaktif güç akışları hesaplanabilmektedir. Bu analiz, elektrik şebekesinin işletilmesi ve planlanması aşamasında gerçekleştirilmesi gereken bir analizdir.

Bir güç sisteminin analiz edilebilmesi için öncelikle hattın modellenmesi gereklidir. Bir enerji iletim hattının modellenmesinde T ya da π eşdeğer devre modeli tercih edilerek şönt süseptans ve seri empedans değerler kullanılarak modelleme gerçekleştirilmektedir. Fakat dağıtım hatlarında şönt süseptansın değeri enerji iletim hatlarına göre oldukça küçük olduğu için bu değer ihmal edilebilir. Böylelikle bir dağıtım sistemi sadece seri empedanstan oluşan kısa hat modeli ile modellenebilir. Şekil 3.1 a'da dağıtım güç sistemlerinin analizinde kullanılan kısa hat modeli görülmektedir. Şekil 3.1 b'de ise rezistif bir yük için hattın fazör diyagramı verilmiştir [33].



Şekil 3. 1 Dağıtım sisteminin kısa hat modeli ve fazör diyagramı

Dağıtım sistemleri, yapısı ve işletimi nedeniyle dengesiz yüklenme durumunda kalabilmektedir. Dengesiz yüklenme tek fazlı, iki fazlı ya da dengesiz üç fazlı yüklerin varlığı durumunda ortaya çıkmaktadır. Bu durum başta kablolar ve transformatörler olmak üzere bu elemanların gereksiz yüklenmesine ve kayıplarının artmasına sebep olmaktadır. Ayrıca gerilimin kontrolünde de problemler meydana gelmektedir. Dengesiz yüklenme durumunda güç akışı analizi yapılabilmesi için dengesiz üç fazlı modelin ele alınması gereklidir. Bu nedenle her faz için farklı parametreler kullanılır ve dengesiz yüklerin modellenmesi gerçekleştirilir. Genellikle orta gerilim şebekelerinde dengesiz yüklenme durumu alçak gerilim şebekesindeki dengesiz yüklenme durumu kadar önemli değildir. Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen analizlerde yüklerin dengeli bir durumda oldukları kabul edilmiştir ve oluşturulan model dengeli üç fazlı sistemin tek fazlı eşdeğer modeline dayanmaktadır [33].

AC güç akışı problemi doğrusal ve konveks olmayan bir problemdir. Bu doğrusal olmayan problemin çözümünde şimdiye kadar Gauss-Seidel, Newton Raphson gibi sayısal yöntemler kullanılmıştır. Teknolojinin gelişmesiyle güç sistemlerinde birçok yeni elemanın eklenmesi sonucunda bu problemin çözümü için yapılan hesaplamalar zorlaşmıştır. Bu nedenle konkav yapıdaki bu tip problemlerin çözümü için doğrusallaştırma yaklaşımları kullanılmaktadır. Yapısında doğrusal olmayan ifadeler bulunduran güç akışı problemleri de MILP ile doğrusal hale getirilebilir. Doğrusal olmayan AC optimum güç akışı probleminin MILP ile yeniden formüle edilmesiyle elde edilen avantajlara baktığımızda, bu yöntemde hızlı, güvenilir ve birçok değişkenin tanımlanmasına olanak tanınarak optimum çözümler elde edilebilmektedir. Bu yöntem günümüzde sıklıkla kullanılmaktadır ve sonuç için en uygun çözümün bulunması yönünde olumlu bir potansiyele sahiptir. Ayrıca, problemin çözümünde kullanılan ticari çözücü ile çözüm sürecinde ayrıntılı bir rapor sunulmaktadır [33].

Ortak enerji depolama sistemlerinin yer aldığı bir güç sisteminde AC optimum güç akışı probleminin MILP yaklaşımına dayalı çözümü için gerilim ve akım ifadelerinin gerçek ve imajiner bileşenlerinin yer aldığı Kirchhoff Kanunları, bara gerilimleri, dal akımları sınırları, bara enjeksiyonları, referans bara ve ortak enerji depolama sistemi kısıtlarının tanımlanması gereklidir. Bu kısıtlara Bölüm 3.2'de yer verilmiştir.

3.2 MILP Matematiksel Modeli

Bu çalışmada, ortak enerji depolama sistemlerin yer aldığı AC bir şebekenin MILP modeli oluşturulmuştur. AC optimum güç akışı problemi aslında doğrusal ve konveks olmayan bir problemdir. Çalışmada yer alan doğrusal AC optimum güç akışı denklemlerinin MILP modeli için Ferreira vd. tarafından [34] ve [35]'te yer alan denklemler kullanılmıştır. Bahsedilen çalışmalarda bu denklemlerin doğrusallaştırılması için Disjunctive Constraints ve Special Ordered Sets of Type 2 (SOS2) teknikleri kullanılmıştır. Disjunctive Constraints, yardımcı karar değişkenlerinin değerine göre kısıtlardan birinin uygulanmasını sağlarken, diğer kısıtın gerçekleştirilmemesinin sağlanmasını garanti etmektedir. SOS2 kısıtları ise en çok iki tane değişkenin pozitif olabileceği ve eğer ikisi de pozitifse bu değerlerin birbirine yakın olmasının gerektiği bir dizi sıralı değişkenlerin modellenmesine izin vermektedir. Bu denklemlerde zaman ifadeleri yer almamaktadır. Statik bir problem için bu eşitlikler geçerlidir ve anlık olarak güç akışı analizi için kullanılabilirler. Zamana bağlı dinamik bir güç akışı analizi yapılmak isteniyorsa bu denklemlere t zaman ifadesinin de eklenmesi gereklidir. Oluşturulan model zamana bağlı olduğu için denklemlere t zaman bileşeni eklenmiştir ve [34] ve [35]'te yer almayan, gerekli bazı denklemler modele dahil edilmiştir.

Ayrıca ortak enerji depolama sistemi modeli için Erdinç vd. tarafından [36]'da yer alan denklemler modele uygun şekilde revize edilerek adapte edilmiştir. Şarj/deşarj gücü ve akımı ile ikili karar değişkenlerinin çarpımında iki değişkenin çarpımının doğrusallaştırılması tekniği kullanılmıştır.

Oluşturulan model akıllı şebeke konsepti içerisinde ileride yapılacak talep cevabı programlarının, yenilenebilir enerji kaynaklarının, akıllı evlerin ve elektrikli araçların eklenmesi gibi başka çalışmalar için kolayca genişletilebilir ve daha spesifik uygulamalara da uyarlanabilir.

3.2.1 Amaç Fonksiyonu

Oluşturulan modelde farklı amaç fonksiyonları oluşturulabilir. Bu durum dağıtım sisteminde gerçekleştirilecek farklı uygulamaların gerçekleştirilmesine olanak tanımaktadır. Amaç fonksiyonu örneğin kayıpların minimize edilmesi, yenilenebilir enerji

kaynaklarının şebekeye bağlantı isteklerinin değerlendirilmesi ve uygun kritere sahip kaynaklara izin verilmesi, en az maliyetle dağıtım sisteminin yeniden yapılandırılması, gerilim kontrolü vb. seçilebilir.

Bu çalışmada amaç fonksiyonunun dağıtım şebekesi omik kayıplarını minimize etmek olduğu varsayılmıştır. Bir dağıtım şebekesinde omik kayıplar iki şekilde hesaplanabilmektedir. İlk seçenek, her bir hattaki kayıpları toplayarak hesaplamaktır. İkinci seçenek ise dağıtım şebekesinde tüketilen toplam aktif güç ve dağıtım şebekesine enjekte edilen toplam aktif güç arasındaki farkı belirleyerek hesaplamaktır. Burada ikinci seçenek ele alınmıştır. Sonuçların kWh türünden alınması için bir saatteki periyot sayısı $\Delta T'$ 'ye bölme işlemi yapılmıştır. Amaç fonksiyonu (3.1) denkleminde ifade edilmiştir. Burada k baraları, Ω_{REF} sistemdeki tüm referans baraların kümesini, V_k^{ref} k referans barasındaki referans gerilimi, $d_{(t,k)}^P$ t anında k barasındaki tüketicilerin aktif yükünü, $I_{g(t,k)}^{re}$ t anında k referans barasından çekilen aktif gücün akımını, $I_{g(t,k)}^{im}$ t anında k referans barasından çekilen reaktif gücün akımını, $\cos \theta_k^{ref}$ ve $\sin \theta_k^{ref}$ ifadeleri ise k referans barasındaki referans kosinüs ve sinüs değerlerini temsil etmektedir.

$$z = \text{minimum} \{ \sum_{t=1}^T (\sum_{k \in \Omega_{REF}} V_k^{ref} \cdot (\cos \theta_k^{ref} \cdot I_{g(t,k)}^{re} + \sin \theta_k^{ref} \cdot I_{g(t,k)}^{im})) / \Delta T + \sum_{k \in \Omega_k} (d_{(t,k)}^P) / \Delta T \} \quad (3.1)$$

3.2.2 Kirchhoff Kanunları

$$I_{d(t,k)}^{re} + \sum_{m \in \Omega_k} I_{(t,k,m)}^{re} + I_{(t,k)}^{OEDS_{ch}} = I_{g(t,k)}^{re} + I_{(t,k)}^{OEDS_{diss}} + \sum_{m \in \Omega_k} I_{(t,m,k)}^{re}, \quad \forall k \in \Omega_B, \forall t \quad (3.2)$$

$$I_{d(t,k)}^{im} + \sum_{m \in \Omega_k} I_{(t,k,m)}^{im} = I_{g(t,k)}^{im} + \sum_{m \in \Omega_k} I_{(t,m,k)}^{im}, \quad \forall k \in \Omega_B, \forall t \quad (3.3)$$

$$V_{(t,k)}^{re} - V_{(t,m)}^{re} = I_{(t,k,m)}^{re} \cdot R_{(k,m)} - I_{(t,k,m)}^{im} \cdot X_{(k,m)}, \quad \forall k, m \in \Psi_C, \forall t \quad (3.4)$$

$$V_{(t,k)}^{im} - V_{(t,m)}^{im} = I_{(t,k,m)}^{re} \cdot X_{(k,m)} - I_{(t,k,m)}^{im} \cdot R_{(k,m)}, \quad \forall k, m \in \Psi_C, \forall t \quad (3.5)$$

(3.2) ve (3.3) denklemlerinde sırasıyla baralardaki reel ve imajiner akım eşitliklerinin yer aldığı Kirchhoff'un akım kanunu modellenmiştir. (3.4) ve (3.5) denklemlerinde ise sırasıyla km dalları boyunca reel ve imajiner gerilim düşümünün ifade edildiği Kirchhoff'un gerilim kanunu modellenmiştir. Kirchhoff'un akım ve gerilim kanunlarına ait

bu denklemler doğrusaldır ve MILP modeline doğrudan eklenebilirler. Bu denklemlerde Ω_B sistemdeki baraların kümesini, km sistemdeki dalları, Ψ_C sistemdeki tüm dalların kümesini, $R_{(k,m)}$ k ve m baralarını bağlayan hattın direncini, $X_{(k,m)}$ k ve m baralarını bağlayan hattın reaktansını, $I_{(t,k,m)}$ t anında k ve m baralarını bağlayan dal boyunca k barasından m barasına akan akımı, $V_{(t,k)}$ t anında k barasındaki gerilimi, $I_{d(t,k)}$ ve $I_{g,(t,k)}$ sırasıyla k barasındaki yük akımını ve k barasına enjekte edilen gücün akımını, $I_{(t,k)}^{OEDS_ch}$ ve $I_{(t,k)}^{OEDS_diss}$ sırasıyla t anında k barasına bağlı ortak enerji depolama sisteminin şarj ve deşarj akımlarını temsil etmektedir.

3.2.3 Bara Enjeksiyonları

(3.6) ve (3.7) denklemlerinde sırasıyla tüketicilerin t anında k barasından talep ettiği reel ve imajiner akım değerleri ifade edilmektedir. Burada $d_{(t,k)}^Q$, tüketicilerin t anında k barasından talep ettiği reaktif yükü temsil etmektedir. Modelde yüklerin sabit güç taleplerinin olduğu kabul edilmiştir. Yükler, sabit güç modelinin dışında sabit akım ve sabit empedans değerlerine sahip olarak da modellenebilmektedirler. Bu denklemlerde gerilimin reel ve imajiner bileşenlerinin yer aldığı $\xi_{(t,k)}$ ve $\zeta_{(t,k)}$ ifadelerinin açılımı ise (3.8) ve (3.9) denklemlerinde verilmiştir. Fakat $\xi_{(t,k)}$ ve $\zeta_{(t,k)}$ 'nin tanımlandığı (3.8) – (3.9) denklemleri doğrusal değildir. Bu denklemlerin MILP modeline dahil edilebilmeleri için doğrusallaştırılmaları gerekmektedir. Doğrusallaştırılan denklemler (3.10) – (3.12) denklemlerinde verilmiştir. Burada SOS2'ye dayalı parçalı doğrusal bir yaklaşım gerçekleştirilmiştir.

$$I_{d(t,k)}^{re} = \xi_{(t,k)} \cdot d_{(t,k)}^P + \zeta_{(t,k)} \cdot d_{(t,k)}^Q, \forall k \in \Omega_B, \forall t \quad (3.6)$$

$$I_{d(t,k)}^{im} = \zeta_{(t,k)} \cdot d_{(t,k)}^P - \xi_{(t,k)} \cdot d_{(t,k)}^Q, \forall k \in \Omega_B, \forall t \quad (3.7)$$

$$\xi_{(t,k)} = V_{(t,k)}^{re} / (V_{(t,k)}^{re^2} + V_{(t,k)}^{im^2}), \forall k \in \Omega_B, \forall t \quad (3.8)$$

$$\zeta_{(t,k)} = V_{(t,k)}^{im} / (V_{(t,k)}^{re^2} + V_{(t,k)}^{im^2}), \forall k \in \Omega_B, \forall t \quad (3.9)$$

$$\sum_{r \in \Gamma^{re}} \sum_{s \in \Gamma^{im}} \lambda_{(t,k)}^{r,s} \begin{bmatrix} \hat{\xi}_k^{r,s} \\ \hat{\zeta}_k^{r,s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \xi_{(t,k)} \\ \zeta_{(t,k)} \end{bmatrix}, \forall k \in \Omega_B, \forall t \quad (3.10)$$

$$\sum_{r \in \Gamma^{re}} \sum_{s \in \Gamma^{im}} \lambda_{(t,k)}^{r,s} \begin{bmatrix} \hat{V}_k^{re,r} \\ \hat{V}_k^{im,s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{(t,k)}^{re} \\ V_{(t,k)}^{im} \end{bmatrix}, \forall k \in \Omega_B, \forall t \quad (3.11)$$

$$\sum_{r \in \Gamma^{re}} \sum_{s \in \Gamma^{im}} \lambda_{(t,k)}^{r,s} = 1, \forall k \in \Omega_B, \forall t \quad (3.12)$$

Burada, Γ^{re} ve Γ^{im} sırasıyla k barasındaki gerilimin reel ve imajiner bileşenleri için değerlendirme noktaları indisleri kümesidir. \wedge ile ifade edilen değişkenler değerlendirme noktalarına ve değerlendirilen değerlere karşılık gelmektedir. $\lambda_{(t,k)}^{r,s}$ değerlendirme noktaları ve değerlendirilen değerlerin kombinasyonu için kullanılan ağırlıklardır. $\xi_{(t,k)}$ ve $\zeta_{(t,k)}$ değerleri (3.10) denklemi yardımıyla bulunur. (3.11) denklemi referans satırı olarak ifade edilmektedir. Bu denklem $\lambda_{(t,k)}^{r,s}$ ağırlıklarının $V_{(t,k)}^{re}$ ve $V_{(t,k)}^{im}$ değişkenleriyle ilişkisini ifade etmektedir. (3.12) denkleminde $\lambda_{(t,k)}^{r,s}$, SOS2 yönteminde ağırlıkların toplamının 1'e eşitliğini sağlamaktadır.

Modellenen sistemde baralarda generatörlerin yer almadığı, sistemin sadece şebekeden enerji aldığı ve diğer baralarda güç üretiminin olmadığı kabul edilmiştir. Bu nedenle generatör ile ilgili denklemlere yer verilmemiştir. Referans baralar dışında sisteme reel ve imajiner güç enjektresinin olmadığı durum aşağıdaki (3.13) ve (3.14) eşitlikleri yardımı ile sağlanmıştır.

$$I_{g(t,k)}^{re} = 0, \forall k \notin \Omega_{REF}, \forall t \quad (3.13)$$

$$I_{g(t,k)}^{im} = 0, \forall k \notin \Omega_{REF}, \forall t \quad (3.14)$$

Denklemlerde, bara geriliminin reel ve imajiner bileşenleri için değerlendirme noktaları ve değerlendirilen değerlerin değişebileceği alt ve üst sınırlar önceden tanımlanmıştır. Bu sınırlamalardan reel bileşenin $[V_k^{re,min}, V_k^{re,max}]$ aralığında sadece pozitif değerler alabileceği açıktır. Fakat bara gerilimlerinin imajiner bileşeni için değerlendirme noktalarının tanımı ise reel bileşene göre daha karmaşıktır. Çünkü bu noktalar $[V_k^{im,min}, V_k^{im,max}]$ aralığında negatif değerler, pozitif değerler ve ayrıca 0 değerini alabilmektedir.

3.2.4 Bara Gerilimleri ve Dal Akımları Sınırları

$$V_{(t,k)} = \sqrt{V_{(t,k)}^{re^2} + V_{(t,k)}^{im^2}}, \forall k \in \Omega_B, \forall t \quad (3.15)$$

$$\sum_{r \in I^{re}} \sum_{s \in I^{im}} \lambda_{(t,k)}^{r,s} \cdot \widehat{V}_k^{r,s} = V_{(t,k)}, \forall k \in \Omega_B, \forall t \quad (3.16)$$

$$V_{(t,k)}^{min} \leq V_{(t,k)} \leq V_{(t,k)}^{max}, \forall k \in \Omega_B, \forall t \quad (3.17)$$

Bara geriliminin reel ve imajiner bileşenlerinin SOS2'ye dayalı parçalı doğrusal yaklaşımı bir önceki bölümde bahsedildiği için bu bölümde sadece bara gerilim büyüklüğü ele alınmıştır. (3.15) denkleminde bara geriliminin kompleks büyüklüğü ifade edilmektedir. Fakat bu ifadenin MILP modeline dahil edilebilmesi için doğrusallaştırılması gereklidir. Bu nedenle bu ifadenin SOS2'ye dayalı parçalı doğrusal yaklaşımı (3.16)'da verilmiştir. Burada bara geriliminin kompleks büyüklüğü hesaplanmaktadır. (3.17) eşitsizliğinde ise bara geriliminin üst ve alt sınır değerleri belirtilmiştir. Örneğin şebekede gerilim sınırları için nominal gerilimin \pm %5 sınırında olması istenirse, bu ifade modele doğrudan tanımlanabilmektedir.

Dal akımlarının parçalı doğrusal yaklaşımının oluşturulmasında ise bara gerilim büyüklüğünde olduğu gibi her bir bara akımının reel ve imajiner bileşeninin doğrusal olmayan ve konveks olmayan farklı diğer karar değişkeni bulunması gerçeğinden yararlanılamaz. Çünkü bu değişkenlerin diğer doğrusal olmayan fonksiyonları yoktur. Dal akımlarının reel ve imajiner bileşenlerinin yaklaşması gereken tek fonksiyon akımın kompleks büyüklüğüdür. Bu aşağıdaki yardımcı karar değişkenleri $l_{(t,k,m)}^{re}$ ve $l_{(t,k,m)}^{im}$ 'nin tanımlanması ile yapılabilir.

$$l_{(t,k,m)}^{re} \geq I_{(t,k,m)}^{re}, \forall k, m \in \Psi_C, \forall t \quad (3.18)$$

$$l_{(t,k,m)}^{re} \geq -I_{(t,k,m)}^{re}, \forall k, m \in \Psi_C, \forall t \quad (3.19)$$

$$l_{(t,k,m)}^{im} \geq I_{(t,k,m)}^{im}, \forall k, m \in \Psi_C, \forall t \quad (3.20)$$

$$l_{(t,k,m)}^{im} \geq -I_{(t,k,m)}^{im}, \forall k, m \in \Psi_C, \forall t \quad (3.21)$$

Akımın kompleks büyüklüğü olan $l_{(t,k,m)}$ akımının bulunmasında ise yardımcı karar değişkenleri $l_{(t,k,m)}^{re}$ ve $l_{(t,k,m)}^{im}$ 'den yararlanılmaktadır. $l_{(t,k,m)}$ akımı bu yardımcı karar değişkenlerinin karelerinin toplamının karekökü hesaplanarak bulunmaktadır. Bu denklem (3.22)'de verilmiştir, fakat bu denklem doğrusal değildir ve MILP modeline dahil edilmez.

$$l_{(t,k,m)} = \sqrt{l_{(t,k,m)}^{re^2} + l_{(t,k,m)}^{im^2}}, \forall k, m \in \Psi_C, \forall t \quad (3.22)$$

Bu doğrusallaştırma işlemi SOS2'ye dayalı parçalı doğrusal bir yaklaşım uygulanarak (3.23)-(3.25) denklemlerinde gerçekleştirmiştir.

$$\sum_{r \in \Pi^l} \sum_{s \in \Pi^l} \omega_{(t,k,m)}^{r,s} \cdot \hat{l}_{(t,k,m)}^{r,s} = l_{(t,k,m)}, \forall k, m \in \Psi_C, \forall t \quad (3.23)$$

$$\sum_{r \in \Pi^l} \sum_{s \in \Pi^l} \omega_{(t,k,m)}^{r,s} \cdot \begin{bmatrix} \hat{l}_{(t,k,m)}^{re,r} \\ \hat{l}_{(t,k,m)}^{im,s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_{(t,k,m)}^{re} \\ l_{(t,k,m)}^{im} \end{bmatrix}, \forall k, m \in \Psi_C, \forall t \quad (3.24)$$

$$\sum_{r \in \Pi^l} \sum_{s \in \Pi^l} \omega_{(t,k,m)}^{r,s} = 1, \forall k, m \in \Psi_C, \forall t \quad (3.25)$$

Burada Π^l , $l_{(t,k,m)}^{re}$ ve $l_{(t,k,m)}^{im}$ için değerlendirme noktaları indisleri kümesidir. $\hat{\cdot}$ işareti ile vurgulanmış değişkenler, değerlendirme noktaları ve değerlendirilen değerlere karşılık gelmektedir. $\omega_{(t,k,m)}^{r,s}$ değerlendirme noktaları ve değerlendirilen değerlerin kombinasyonu için kullanılan ağırlıklardır.

$l_{(t,k,m)}^{re}$ ve $l_{(t,k,m)}^{im}$ sadece negatif olmayan $[0, I_{km}^{max}]$ aralığında değişmektedir. $l_{(t,k,m)}$ ifadesi daha önceki denklemler yardımıyla elde edildikten sonra (3.26) eşitsizliğinde bu dal akımlarının sınırlandırılması yapılmıştır. Böyle bir sınırlandırmaya kablo kesitinin taşıyabileceği maksimum akım kapasitesinin belli olması nedeniyle gereksinim vardır. Kablonun kapasitesinden fazla akım taşınması kablunun ısınmasına, ekonomik ömrünün azalmasına, kablo yalıtkanının zorlanmasına ve hatta delinmesine yol açabilir. Ayrıca bu durum enerji sistemlerinin planlamasında yapılan ısınma tahkiki ve gerilim düşümü hesaplarına da uymayabilir.

$$l_{(t,k,m)} \leq I_{(t,k,m)}^{max}, \forall k, m \in \Psi_C, \forall t \quad (3.26)$$

3.2.5 Açısıl Referans Bara

Modellenen sistem sadece şebekeden enerji almaktadır. Bu nedenle şebekenin bağlı olduğu baralar açısıl referans bara olarak kabul edilmiştir. Açısıl referans baraların gerilim büyüklüğünün sistem açısından bir parametre olduğu varsayılmıştır. Bu ifadeler sistemde bir karar değişkeni olarak kullanılamamaktadır. Açısıl referans baranın reel ve imajiner bileşenleri sırasıyla (3.27) ve (3.28) denklemlerinde verilmiştir.

$$V_k^{re} = V_k^{ref} \cdot \cos \theta_k^{ref}, \forall k \in \Omega_{REF} \quad (3.27)$$

$$V_k^{im} = V_k^{ref} \cdot \sin \theta_k^{ref}, \forall k \in \Omega_{REF} \quad (3.28)$$

3.2.6 Ortak Enerji Depolama Sistemi Modeli

CR_{OEDS} , DR_{OEDS} , CE_{OEDS} , DE_{OEDS} , $SOE_{(t,k)}^{OEDS}$ ifadeleri sırasıyla ortak enerji depolama sisteminin şarj oranını, deşarj oranını, şarj verimliliğini, deşarj verimliliğini ve enerji durumunu belirtmektedir. $u_{(t,k)}^{OEDS_dis}$ ve $u_{(t,k)}^{OEDS_ch}$ ifadeleri ise sırasıyla ortak enerji depolama sisteminin deşarj ve şarjı için kullanılan ikili karar değişkenleridir. Bu karar değişkenleri t anında k barasındaki ortak enerji depolama sisteminin şarj ya da deşarj olup olmadığını ifade etmektedirler. Eğer $u_{(t,k)}^{OEDS_dis}$ değişkeni 1 değerini alırsa ortak enerji depolama sistemi deşarj olmakta, 0 değerini alırsa deşarj olmamaktadır ve benzer şekilde $u_{(t,k)}^{OEDS_ch}$ değişkeni 1 değerini alırsa ortak enerji depolama sistemi şarj olmakta, 0 değerini alırsa şarj olmamaktadır. Bataryanın aynı anda şarj ve deşarjından kaçınmak için bu değerlerin aynı anda 1 değerini almaması (3.47) kısıtı ile sağlanmaktadır. (3.29)-(3.30) denklemleri t zamanında k barasındaki ortak enerji depolama sisteminin sırasıyla şarj ve deşarj akım değerlerini hesaplamaktadır. Ortak enerji depolama sisteminin şarj ve deşarj akım değerlerini Kirchhoff akım denklemlerine eklemek istediğimizde, $u_{(t,k)}^{OEDS_dis}$ ve $u_{(t,k)}^{OEDS_ch}$ ikili karar değişkenleri ile bu akım değerlerinin çarpımının doğrusal olmamasından dolayı bu ifadelerin denklemlere dahil edilemeyeceği görülmektedir. Ortak enerji depolama sistemi deşarj akımı $I_{(t,k)}^{OEDS_dis}$ ve ikili karar değişkeni $u_{(t,k)}^{OEDS_dis}$ ile ortak enerji depolama sistemi şarj akımı $I_{(t,k)}^{OEDS_ch}$ ve ikili karar değişkeni $u_{(t,k)}^{OEDS_ch}$ 'ın çarpımından elde edilen yeni ifadeler sırasıyla $I_{(t,k)}^{OEDS_diss}$ değeri (3.31)-(3.34) denklemlerinden ve $I_{(t,k)}^{OEDS_chs}$ 'nın değeri (3.35)-(3.38) denklemlerinden bulunmaktadır. (3.31)-(3.34) ve (3.35)-(3.38) denklemlerinde doğrusallaştırma yöntemi kullanılarak iki farklı değişkenin çarpım işlemi yapılmıştır. Yeni hesaplanan bu akım değerleri Kirchhoff akım denklemlerine eklenebilmektedir. Denklemlerdeki M ifadesi çok büyük bir sayıyı temsil etmektedir. (3.48)-(3.51) kısıtları enerji depolama sisteminin enerji durumunu belirtmektedir. (3.48) kısıtı her bir t zamanındaki enerji durumunun ($SOE_{(t,k)}^{OEDS}$) bir önceki ($t-1$) zamanında sahip olduğu değer ($SOE_{(t-1,k)}^{OEDS}$) ve bataryadan şarj ya da

deşarj yapılan değerin toplanılması ya da çıkarılmasıyla elde edileceğini belirtmektedir. (3.49) kısıtı, ortak enerji depolama sisteminin enerji durumunun ($SOE_{(t,k)}^{OEDS}$) zaman aralığının başlangıcında başlangıç enerji durumuna ($SOE_{(t,k)}^{OEDS,ini}$) eşit olduğunu belirtmektedir. (3.50) kısıtı, ortak enerji depolama sisteminin şarj durumunun maksimum enerji depolama kapasitesinden küçük olmasını sağlamaktadır. Benzer şekilde (3.51) kısıtı da bataryanın derindeşarjından kaçınılması için bataryadaki enerji durumunun izin verilen minimum değerden büyük olmasını sağlamaktadır. Derindeşarj, bataryadaki enerjinin belirtilendeşarj derinliğinin altına inmesi sonucunda meydana gelmektedir. Sürekli derindeşarj edilen bataryaların bir süre sonra daha önce depolayabildikleri kadar enerji depolayamadıkları görülmektedir. Bu nedenle bataryadaki enerji durumunun minimum bir değerde sınırlandırılması gerekmektedir. Şarj gücü $P_{(t,k)}^{OEDS_ch}$ vedeşarj gücü $P_{(t,k)}^{OEDS_dis}$, in ikili karar değişkenleri ile çarpımının doğrusallaştırılması için yukarıda akım için bahsedilenlere benzer işlemler yapılmıştır. Bu işlemler şarj gücü vedeşarj gücü için sırasıyla (3.39)-(3.42) ve (3.43)-(3.46) eşitsizlikleriyle verilmiştir. Ayrıca ortak enerji depolama sisteminin şarj vedeşarj gücünün sınırları da bu eşitsizliklerde yer almaktadır. Ψ_k sistemde ortak enerji depolama sistemi yer alan tüm baraların kümesini temsil etmektedir.

$$I_{(t,k)}^{OEDS_ch} = \xi_{(t,k)} \cdot CR_{OEDS}, \forall k \in \Psi_k, \forall t \quad (3.29)$$

$$I_{(t,k)}^{OEDS_dis} \leq \xi_{(t,k)} \cdot DR_{OEDS} \cdot DE_{OEDS}, \forall k \in \Psi_k, \forall t \quad (3.30)$$

$$I_{(t,k)}^{OEDS_diss} \leq M \cdot (u_{(t,k)}^{OEDS_dis}), \forall k \in \Psi_k, \forall t \quad (3.31)$$

$$I_{(t,k)}^{OEDS_diss} \leq I_{(t,k)}^{OEDS_dis}, \forall k \in \Psi_k, \forall t \quad (3.32)$$

$$I_{(t,k)}^{OEDS_diss} \geq I_{(t,k)}^{OEDS_dis} - (1 - (u_{(t,k)}^{OEDS_dis})). M, \forall k \in \Psi_k, \forall t \quad (3.33)$$

$$I_{(t,k)}^{OEDS_diss} \geq 0, \forall k \in \Psi_k, \forall t \quad (3.34)$$

$$I_{(t,k)}^{OEDS_chs} \leq M \cdot (u_{(t,k)}^{OEDS_ch}), \forall k \in \Psi_k, \forall t \quad (3.35)$$

$$I_{(t,k)}^{OEDS_chs} \leq I_{(t,k)}^{OEDS_ch}, \forall k \in \Psi_k, \forall t \quad (3.36)$$

$$I_{(t,k)}^{OEDS_chs} \geq I_{(t,k)}^{OEDS_ch} - (1 - u_{(t,k)}^{OEDS_ch}). M, \forall k \in \Psi_k, \forall t \quad (3.37)$$

$$I_{(t,k)}^{OEDS_chs} \geq 0, \forall k \in \Psi_k, \forall t \quad (3.38)$$

$$P_{(t,k)}^{OEDS_dis} \leq M \cdot (u_{(t,k)}^{OEDS_dis}), \forall k \in \Psi_k, \forall t \quad (3.39)$$

$$P_{(t,k)}^{OEDS_dis} \leq DR_{OEDS} \times DE_{OEDS}, \forall k \in \Psi_k, \forall t \quad (3.40)$$

$$P_{(t,k)}^{OEDS_dis} \leq DR_{OEDS} \times DE_{OEDS} - \left(1 - (u_{(t,k)}^{OEDS_dis})\right) \cdot M, \forall k \in \Psi_k, \forall t \quad (3.41)$$

$$P_{(t,k)}^{OEDS_dis} \geq 0, \forall k \in \Psi_k, \forall t \quad (3.42)$$

$$P_{(t,k)}^{OEDS_ch} \leq M \cdot (u_{(t,k)}^{OEDS_ch}), \forall k \in \Psi_k, \forall t \quad (3.43)$$

$$P_{(t,k)}^{OEDS_ch} \leq CR_{OEDS}, \forall k \in \Psi_k, \forall t \quad (3.44)$$

$$P_{(t,k)}^{OEDS_ch} \leq CR_{OEDS} - \left(1 - (u_{(t,k)}^{OEDS_ch})\right) \cdot M, \forall k \in \Psi_k, \forall t \quad (3.45)$$

$$P_{(t,k)}^{OEDS_ch} \geq 0, \forall k \in \Psi_k, \forall t \quad (3.46)$$

$$u_{(t,k)}^{OEDS_ch} + u_{(t,k)}^{OEDS_dis} \leq 1, \forall k \in \Psi_k, \forall t \quad (3.47)$$

$$SOE_{(t,k)}^{OEDS} = SOE_{OEDS((t-1),k)} + CE_{OEDS} \cdot \frac{P_{(t,k)}^{OEDS_ch}}{\Delta T} - \frac{P_{(t,k)}^{OEDS_dis}}{\Delta T}, \forall k \in \Psi_k, \forall t \geq 1 \quad (3.48)$$

$$SOE_{(t,k)}^{OEDS} = SOE_{(t,k)}^{OEDS,ini}, t = 1, \forall k \in \Psi_k \quad (3.49)$$

$$SOE_{(t,k)}^{OEDS} \leq SOE_{(t,k)}^{OEDS,max}, \forall k \in \Psi_k, \forall t \quad (3.50)$$

$$SOE_{(t,k)}^{OEDS} \geq SOE_{(t,k)}^{OEDS,min}, \forall k \in \Psi_k, \forall t \quad (3.51)$$

TEST SONUÇLARI VE YORUMLAR

Bölüm 3'te açıklanan sistemin matematiksel modellemesi General Algebraic Modeling Systems (GAMS) v.24.1.3 programında yazılmıştır. Ayrıca MILP modelinin GAMS kodları Ek-A'da verilmiştir. GAMS matematiksel programlama ve optimizasyon problemleri için üst düzey bir modelleme sistemidir. Doğrusal, doğrusal olmayan ve MILP optimizasyon problemlerinin çözümü için kullanılmaktadır ve karmaşık ve büyük ölçekli modellemeler için uygun bir programdır. Kullanıcılar matematiksel ifadelerle modellerini kolaylıkla oluşturabilmektedirler. GAMS dili yaygın kullanılan programlama dillerine benzemektedir ve kullanıcıya kolay bir şekilde modelleme yapma olanağı tanır. Excel vb. programlardan veri alabilmektedir ve benzer şekilde verileri dışarı aktarabilmektedir. Optimizasyon problemlerinin çözümü için CONOPT 3, DECIS, GUROBI 7.5, LS, CPLEX, MINOS ve daha birçok çözücüye sahiptir. Burada optimizasyon probleminin çözümü için ticari çözücü CPLEX v.12.5.1 kullanılmıştır.

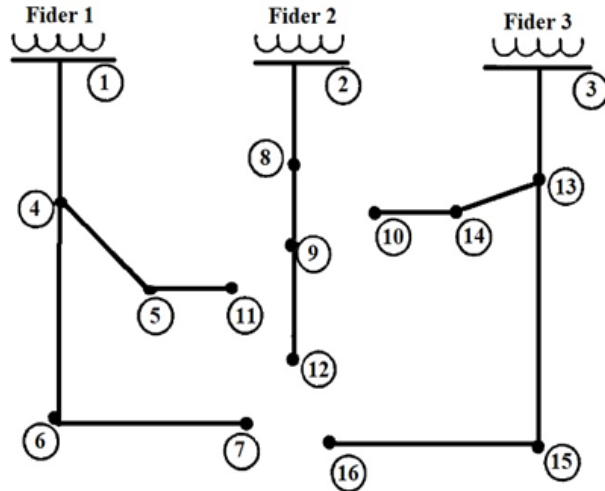
Çalışmada ilk olarak modellenen sistemin güç akışı kısmının doğruluğunun belirlenmesi açısından bir test sisteminde doğruluğu incelenecektir. Bu konu bölüm 4.1'de ele alınmıştır.

4.1 Matematiksel Modelin Güç Akışı Bölümünün Test Edilmesi

Güç akışı formülasyonunun doğruluğunu kanıtlamak için [37]'de yer alan test sistemi verileri kullanılmıştır. Test sistemi, 3 ayrı fider ve 3'ü referans bara olmak üzere toplam 16 baradan oluşmaktadır ve gerilim seviyesi 23 kV'tur. Toplam sistem aktif yükü 28,7 MW'dır. Test sistemi yük verileri Çizelge 4.1'de verilmiştir. Burada bazı baralarda kapasitör de yer almaktadır. Test sistemi hat modeli ise Şekil 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4. 1 Test sistemi yük verileri

| Bara Numarası | Aktif Yük [MW] | Reaktif Yük [MVAR] | Kapasitör [MVAR] |
|---------------|----------------|--------------------|------------------|
| 4 | 2 | 1,6 | - |
| 5 | 3 | 1,5 | 1,1 |
| 6 | 2 | 0,8 | 1,2 |
| 7 | 1,5 | 1,2 | - |
| 8 | 4 | 2,7 | - |
| 9 | 5 | 3 | 1,2 |
| 10 | 1 | 0,9 | - |
| 11 | 0,6 | 0,1 | 0,6 |
| 12 | 4,5 | 2 | 3,7 |
| 13 | 1 | 0,9 | - |
| 14 | 1 | 0,7 | 1,8 |
| 15 | 1 | 0,9 | - |
| 16 | 2,1 | 1 | 1,8 |



Şekil 4. 1 Matematiksel modellenmesi yapılan hat modeli

Test sisteminde hatların direnç ve reaktans verileri Çizelge 4.2'de verilmiştir. Ayrıca burada sistemdeki dalların hangi baralar arasında yer aldığı da belirtilmiştir.

Çizelge 4. 2 Test sistemi hat verileri

| Hat Adı | Başlangıç Barası | Bitiş Barası | Hattın Direnci [ohm] | Hattın Reaktansı [ohm] |
|---------|------------------|--------------|----------------------|------------------------|
| Hat 1 | 1 | 4 | 0,39675 | 0,047 |
| Hat 2 | 2 | 8 | 0,5819 | 0,2511 |
| Hat 3 | 3 | 13 | 0,5819 | 0,1864 |
| Hat 4 | 4 | 5 | 0,4232 | 0,1941 |
| Hat 5 | 4 | 6 | 0,4761 | 0,707 |
| Hat 6 | 5 | 11 | 0,2116 | 0,6188 |
| Hat 7 | 6 | 7 | 0,2116 | 0,2351 |
| Hat 8 | 8 | 9 | 0,4232 | 0,74 |
| Hat 9 | 9 | 12 | 0,4232 | 0,74 |
| Hat 10 | 13 | 14 | 0,4761 | 0,065 |
| Hat 11 | 13 | 15 | 0,4232 | 0,1238 |
| Hat 12 | 14 | 10 | 0,2116 | 1,155 |
| Hat 13 | 15 | 16 | 0,2116 | 0,7129 |

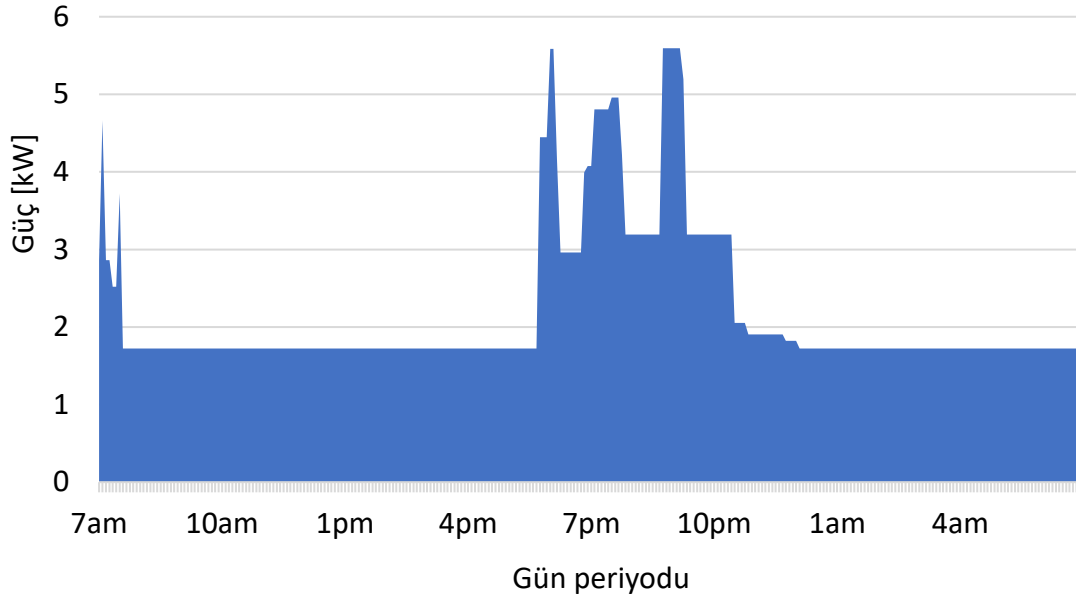
Çalışma sonucunda güç akışı için Borghetti vd. tarafından [38] ve Ferreira vd. tarafından [34] ve [35]'te aynı sistem için yapılan çalışmanın sonuçları ile yakın sonuçlar elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4. 3 Test sistemi sonuçları

| | Şebeke Kayıpları [kW] |
|--|-----------------------|
| Test sistemi MILP Çözümünden Elde Edilen Değer | 462,63 |
| [38]'deki çalışmanın MILP Çözümü | 466,127 |
| [34] ve [35]'teki çalışmanın MILP Çözümü | 481,3 |

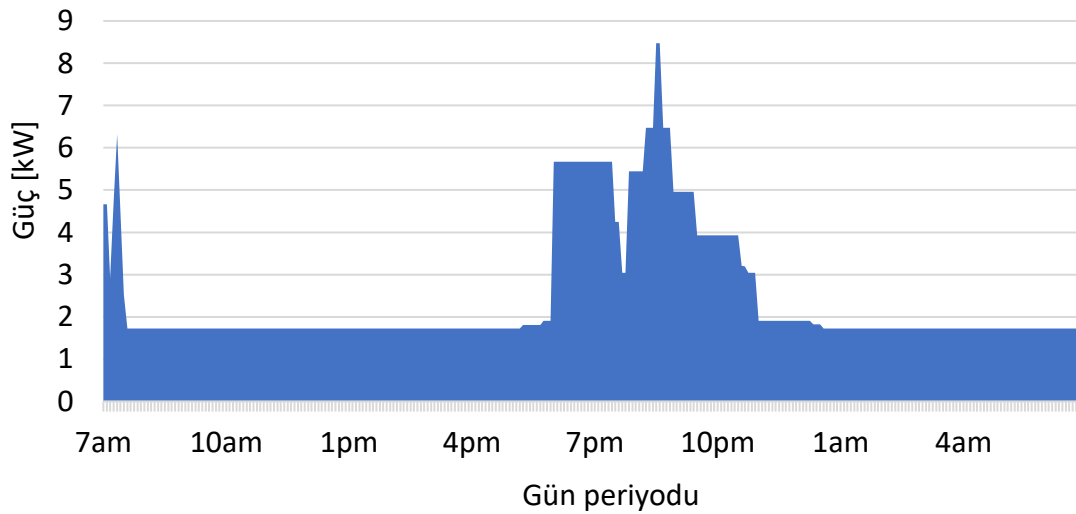
4.2 Matematiksel Model Kullanılarak Yapılan Uygulama

Sunulan matematiksel modeli kanıtlamak için yapılan uygulamada, test sisteminde kullanılan hat modeli dikkate alınmıştır. Sistemde her bir barada farklı yük tiplerinin oluşturduğu yük grupları düşünülmüştür. Yük grupları 3 farklı tip evden oluşan yükleri içermektedir. İlk ev tipi Ev 1, tipik hafta içi saatlerinde çalışan tek bir kişinin yaşadığı bir konuttur. Bu ev tipine ait esnek olmayan yük profili Şekil 4.2’de verilmiştir.



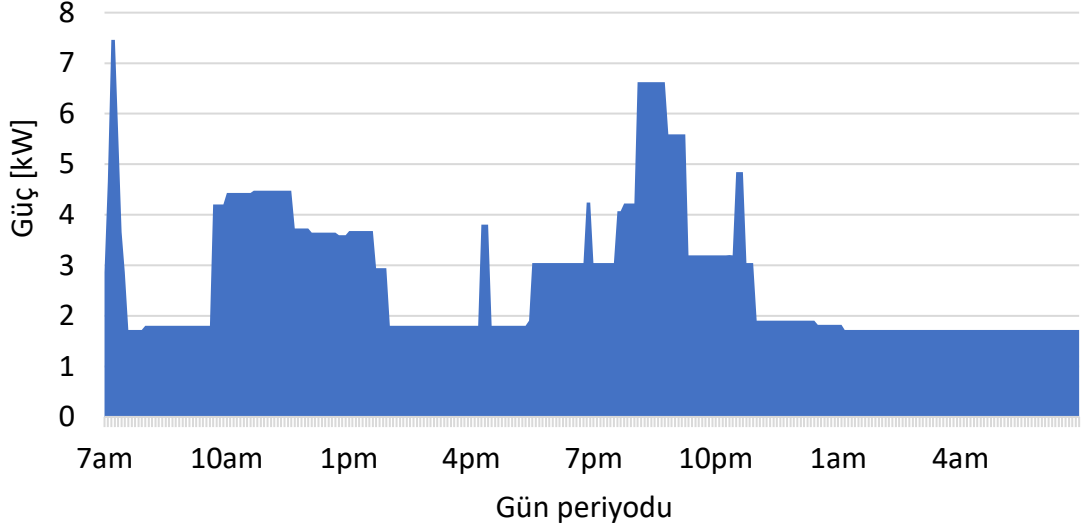
Şekil 4. 2 Ev 1'in esnek olmayan yük profili (tek kişinin yaşadığı konut)

İkinci ev tipi Ev 2’de iki kişi yaşamaktadır. Bu kişiler tipik hafta içi saatlerinde çalışmaktadırlar. Bu ev tipine ait esnek olmayan yük profili Şekil 4.3’te verilmiştir.



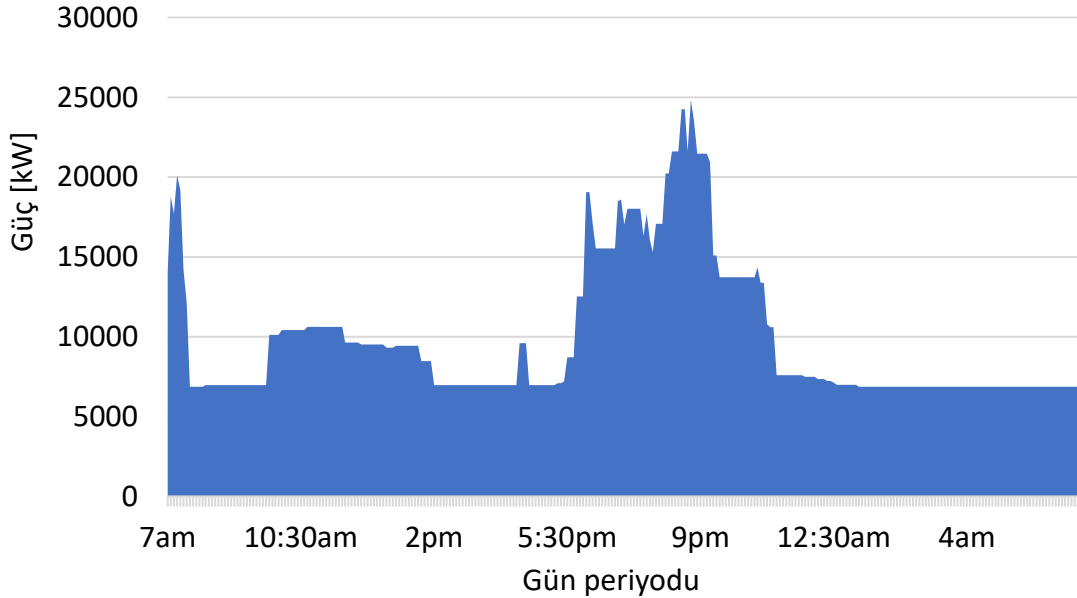
Şekil 4. 3 Ev 2'nin esnek olmayan yük profili (gün boyu çalışan çiftin yaşadığı konut)

Son olarak, üçüncü ev tipi Ev 3 ise 4 kişilik bir aileden oluşmaktadır. Ebeveynlerden birinin çalışmadığı düşünülmüştür. Bu ev tipine ait esnek olmayan yük profili Şekil 4.4'te verilmiştir.



Şekil 4. 4 Ev 3'ün esnek olmayan yük profili (dört üyeli bir ailenin yaşadığı konut)

Tüketicilerin zamana bağlı toplam aktif yükleri ise sırasıyla Şekil 4.5'te gösterilmiştir. Ayrıca sistemdeki her bir evin kendi aktif gücünün %10'u kadar reaktif güç tükettiği kabul edilmiştir.



Şekil 4. 5 Sistemdeki toplam aktif yük (kW)

Bu 3 ev tipinin yük profilleri çeşitli tipik ev aletleri dikkate alınarak oluşturulmuştur. Bu tipik ev aletlerinin nominal güç ve kullanım süreleri Çizelge 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4. 4 Ev aletleri bilgileri

| Cihaz | Anma Gücü | Periyot Sayısı (5 dakika) | | |
|----------------------|-----------|---------------------------|------|------|
| | [kW] | Ev 1 | Ev 2 | Ev 3 |
| Buzdolabı | 1.67 | 288 | 288 | 288 |
| Ütü | 2.4 | 6 | 13 | 15 |
| Tost Makinası | 0.8 | 2 | 3 | 4 |
| Su Isıtıcısı | 2 | 2 | 4 | 6 |
| Saç Kurutma Makinası | 1.8 | 1 | 4 | 6 |
| Telefon | 0.005 | 288 | 288 | 288 |
| Televizyon | 0.083 | 58 | 85 | 187 |
| Masaüstü Bilgisayar | 0.15 | 40 | 22 | 33 |
| Klima | 1.14 | 58 | 64 | 101 |
| Saç Düzleştirici | 0.055 | 0 | 2 | 0 |
| Fırın | 2.4 | 5 | 18 | 24 |
| Mikrodalga Fırın | 1.2 | 1 | 2 | 2 |
| Yazıcı | 0.011 | 0 | 1 | 1 |
| Davlumbaz | 0.225 | 5 | 18 | 20 |
| Aydınlatma | 0.1 | 76 | 82 | 93 |
| Diğer (Sabit) | 0.05 | 288 | 288 | 288 |
| Çamaşır Makinası | 0.733 | 8 | 20 | 24 |
| Bulaşık Makinası | 1.03 | 12 | 15 | 15 |

Oluşturulan modelde her bir baradaki toplam yükün farklı olması açısından ev tiplerinin sayısının farklı olduğu düşünülmüştür. Baralarda yükleri oluşturan ev tiplerinin sayıları Çizelge 4.5'te verilmiştir.

Çizelge 4. 5 Baralarda ev sayıları

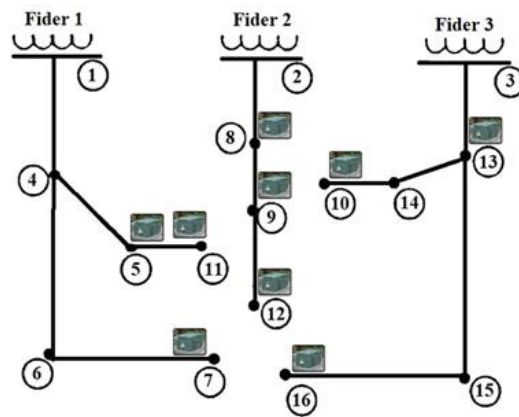
| Baralar | Ev1 Sayısı | Ev2 Sayısı | Ev3 Sayısı | Toplam Ev Sayısı |
|---------|------------|------------|------------|------------------|
| Bara 1 | 100 | 80 | 60 | 240 |
| Bara 2 | 80 | 60 | 100 | 240 |
| Bara 3 | 60 | 100 | 80 | 240 |
| Bara 4 | 90 | 70 | 50 | 210 |
| Bara 5 | 70 | 50 | 90 | 210 |
| Bara 6 | 50 | 90 | 70 | 210 |
| Bara 7 | 110 | 90 | 70 | 270 |
| Bara 8 | 90 | 70 | 110 | 270 |
| Bara 9 | 70 | 110 | 90 | 270 |
| Bara 10 | 100 | 95 | 85 | 280 |
| Bara 11 | 95 | 85 | 100 | 280 |
| Bara 12 | 85 | 100 | 95 | 280 |
| Bara 13 | 75 | 85 | 90 | 250 |
| Bara 14 | 90 | 75 | 85 | 250 |
| Bara 15 | 85 | 90 | 75 | 250 |
| Bara 16 | 100 | 80 | 60 | 240 |

Çalışmada üç senaryo incelenmiştir. Senaryo 1 temel durum olarak adlandırılan, ortak enerji depolama sistemlerinin yer almadığı durumdur. Senaryo 2 ve Senaryo 3'te sisteme ortak enerji depolama sistemleri de dahil edilmiştir. Her iki senaryoda da 5, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13 ve 16 numaralı baralarda ortak enerji depolama sistemi yer almaktadır. Ortak enerji depolama sistemlerinin Senaryo 2 ve 3'te baralarda yer aldığı durum Şekil 4.6'da verilmiştir. Ortak enerji depolama sistemleri aynı senaryo için aynı özelliklere sahiptir. Ortak enerji depolama sistemlerine ait veriler Çizelge 4.6'da verilmiştir. Senaryo 2'de kullanılan Ortak Enerji Depolama Sistemi 1'in enerji kapasitesi 250 kWh ve Senaryo 3'te

kullanılan Ortak Enerji Depolama Sistemi 2'nin enerji kapasitesi 500 kWh'tir. Minimum enerji düzeyleri de gözönüne alındığında Ortak Enerji Depolama Sistemi 1 şebekeye 1 saat ve Ortak Enerji Depolama Sistemi 2 şebekeye 2 saat enerji sağlayabilmektedir. Ortak enerji depolama sistemlerinde en çok Lityum-İyon bataryalar tercih edilmektedir. Bu bataryaların verimlilikleri oldukça yüksektir, fakat şarj ve deşarj sırasında az da olsa kayıplar meydana gelmektedir. Bu nedenle her iki tip depolama sisteminin şarj ve deşarj verimlilikleri 0,99 olarak alınmıştır. Her iki ortak enerji depolama sisteminin de başlangıçtaki enerji durumlarının minimum enerji düzeyinde olduğu düşünülmüştür. Bataryaların derin deşarjından kaçınılmak için minimum enerji düzeyleri, batarya enerji kapasitelerinin %20'si kadar belirlenmiştir.

Çizelge 4. 6 Ortak enerji depolama sistemi verileri

| Ortak Enerji Depolama Sistemi Bilgileri | Ortak Enerji Depolama Sistemi 1 | Ortak Enerji Depolama Sistemi 2 |
|---|---------------------------------|---------------------------------|
| Şarj Oranı | 200 kW | 200 kW |
| Deşarj Oranı | 200 kW | 200 kW |
| Şarj Verimliliği | 0,99 | 0,99 |
| Deşarj Verimliliği | 0,99 | 0,99 |
| Başlangıç Enerji Durumu | 50 kWh | 100 kWh |
| Maksimum Enerji Durumu | 250 kWh | 500 kWh |
| Minimum Enerji Durumu | 50 kWh | 100 kWh |



Şekil 4. 6 Ortak enerji depolama sistemlerinin yer aldığı baralar

4.3 Sonuçlar ve Karşılaştırmalar

Yapılan senaryo sonuçlarına göre hat kayıpları izelge 4.7’de verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, temel durum ile karşılaştırıldığında her iki tip depolama sisteminin yer aldığı durumda da kayıpların azaldığı görülmüştür. Senaryo 2’de hat kaybı Senaryo 1’e göre daha az seviyededir. En az hat kaybı ise Senaryo 3’te meydana gelmiştir. Senaryo 3’te enerji kapasitesinin 250 kWh’den 500 kWh’e çıkarılması ile enerji kayıplarında enerji tasarrufu artmıştır. Fakat depolama sisteminin enerji kapasitesi 2 katına çıkarken, elde edilen enerji tasarrufu bu orandan daha azdır.

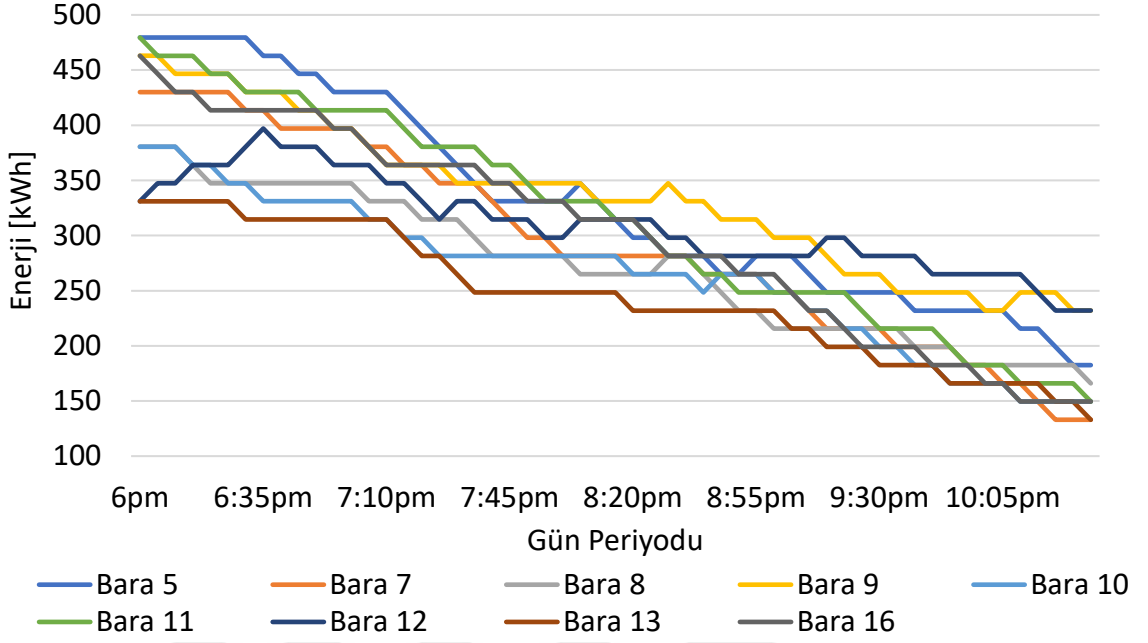
Çizelge 4. 7 Hat kayıpları

| Ortak Enerji Depolama Sistemi | | Toplam Hat Kaybı (kWh) |
|---|------------------------|------------------------|
| Senaryo / Ortak Enerji Depolama Sistemi | Yer Aldığı Baralar | |
| Senaryo 1 (Temel Durum) | - | 891,37 |
| Senaryo 2 / Ortak Enerji Depolama Sistemi 1 | 5,7,8,9,10,11,12,13,16 | 846,66 |
| Senaryo 3 / Ortak Enerji Depolama Sistemi 2 | 5,7,8,9,10,11,12,13,16 | 836,46 |

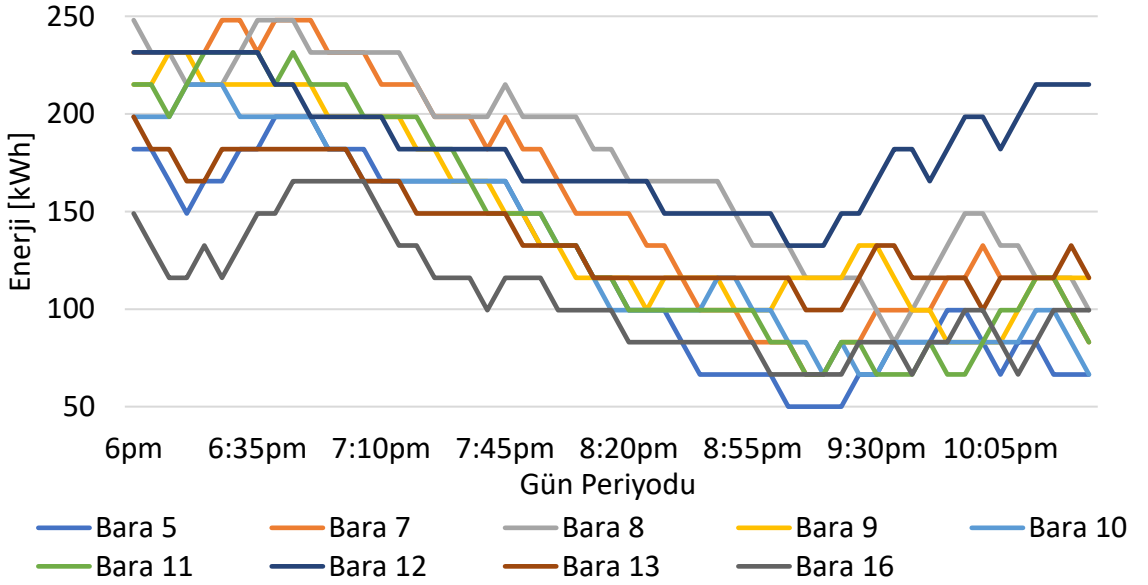
Baralara ortak enerji depolama sistemlerinin yerleştirildiği Senaryo 2 ve Senaryo 3’te ortak enerji depolama sistemleri enerji tketiciminin nispeten daha az olduğu saatlerde şarj olarak ve enerji tketiciminin pik olduğu saatlerde deşarj olarak şebekeden çekilen toplam aktif akım değerini (I_g^{re}) azaltmıştır. Ayrıca enerji tketiciminin pik olduğu saatlerde şebekede pik enerji ihtiyacı, elektrik birim fiyatının daha yüksek olduğu pik enerji santrallerinden karşılanmaktadır. Elektrik maliyetinin düşük olması istenildiğinden, pik saatlerde enerji tketiciminin azaltılmasına ihtiyaç vardır. Ortak enerji depolama sistemleri pik saatlerde şebekeden çekilen enerjiyi düşürerek bu santrallere olan ihtiyacı azaltmaktadır.

Oluşturulan yk profillerine bakıldığında g talebinin özellikle 18:00 – 22:30 saatleri arasında en st seviyede olduğu görülmektedir. Bu saatlerde ortak enerji depolama sistemlerinin enerji durumlarını gösteren şekiller sırasıyla şekil 4.7 ve 4.8’de verilmiştir. şekillere göre Senaryo 2 ve Senaryo 3’te ortak enerji depolama sistemlerinin (Ortak

Enerji Depolama Sistemi 1, Ortak Enerji Depolama Sistemi 2) enerji talebinin arttığı saatlerde deşarj oldukları görülmüştür.



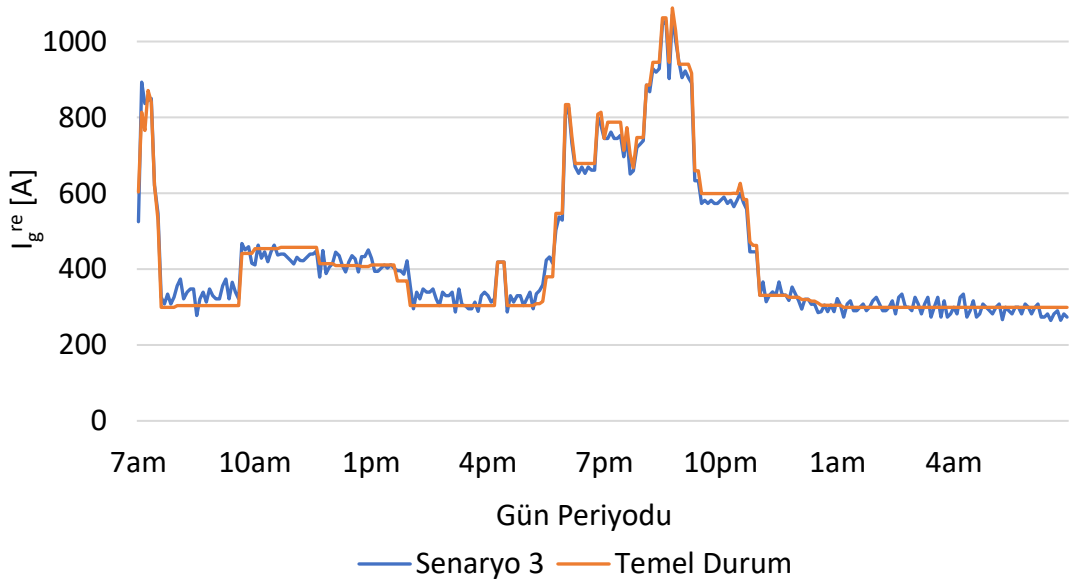
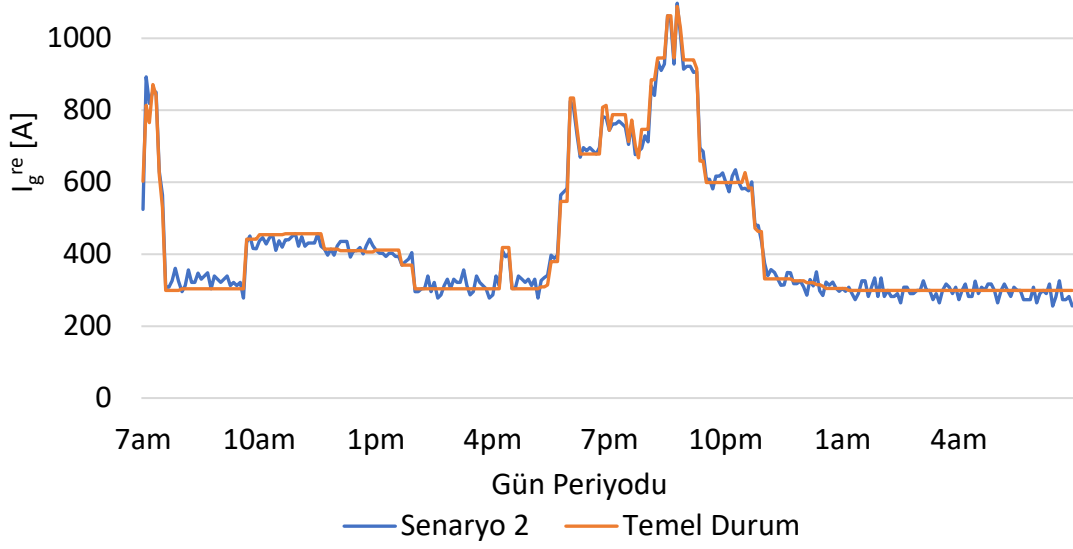
Şekil 4. 7 Senaryo 2’de ortak enerji depolama sistemlerinin enerji durumu



Şekil 4. 8 Senaryo 3’te ortak enerji depolama sistemlerinin enerji durumu

Senaryo 2 ve Senaryo 3’te ortak enerji depolama sistemlerinin kullanılması durumunda şebekeden çekilen akımın aktif değerleri Şekil 4.9 ve Şekil 4.10’da verilmiştir. Şekillere göre pik saatlerde enerjinin bir kısmı ortak enerji depolama sistemlerinden sağlanmıştır ve böylece şebekeden çekilen aktif akım değerleri azaltılmıştır. Ortak enerji depolama sistemleri pik enerji tüketimini nispeten daha az enerji tüketimi olan saatlere kaydırarak

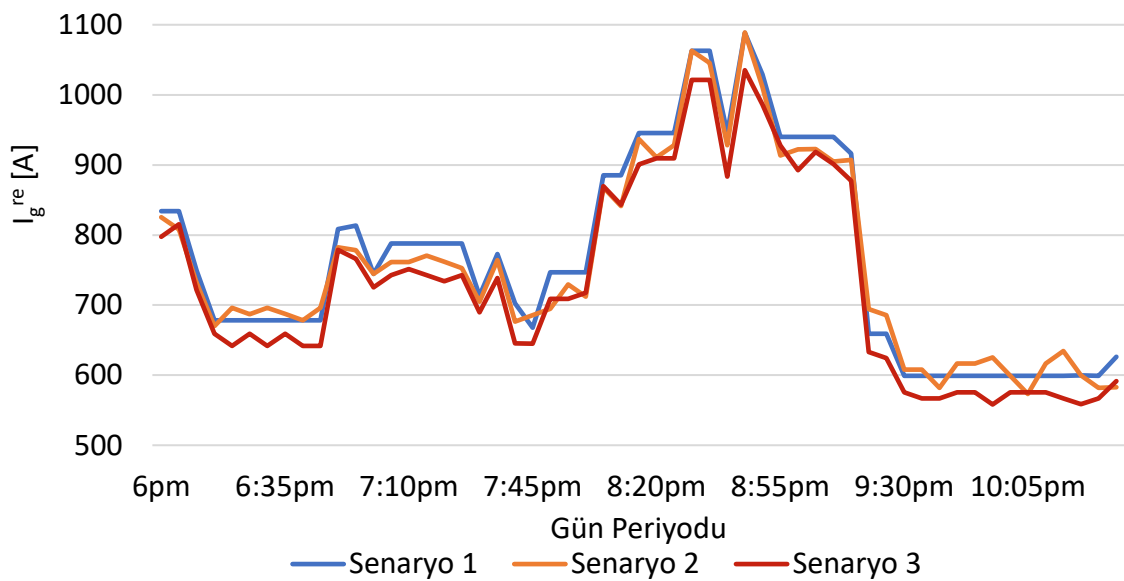
yük düzeltme yapmıştır. Ayrıca yük faktörü tüm sistem için Senaryo 1’de 0,397933’dir. Senaryo 2’de Senaryo 1 ile yaklaşık aynı değerde iken, Senaryo 3’te 0,408245 değerine yükselmiştir.



Ortak enerji depolama sistemleri, her iki senaryoda da başlangıçtaki enerji durumları minimum seviyede iken yoğun enerji talep periyotlarından önce şarj olup yoğun pik talep periyotlarında şebekeye yardımcı olmuşlardır. Örneğin Şekil 4.9’da ortak enerji

depolama sistemlerinin kullanılması ile saat 10:00 ile 12:00 arasında yüksek olan enerji talebinin azaldığı gözlenirken, enerji talebinin daha az olduğu 07:40 ile 10:00 saatleri arasında şebekeden çekilen akım değerinde bir artış meydana gelmiştir. Ortak enerji depolama sistemleri 10:00 ile 12:00 saatleri arasında enerji ihtiyacının bir bölümünü 07:40 ile 10:00 saatleri arasına kaydırmıştır. Benzer şekilde, gün içerisinde en yüksek enerji ihtiyacının olduğu 18:00 ile 22:30 saatleri arasında enerji talebinde temel duruma göre azalma meydana gelmiştir. 14:00 ile 17:30 saatleri arasında ortak enerji depolama sistemleri şarj olarak 18:00 ile 22:30 saatleri arasındaki yükün bir bölümünü bu saatlere kaydırmışlardır.

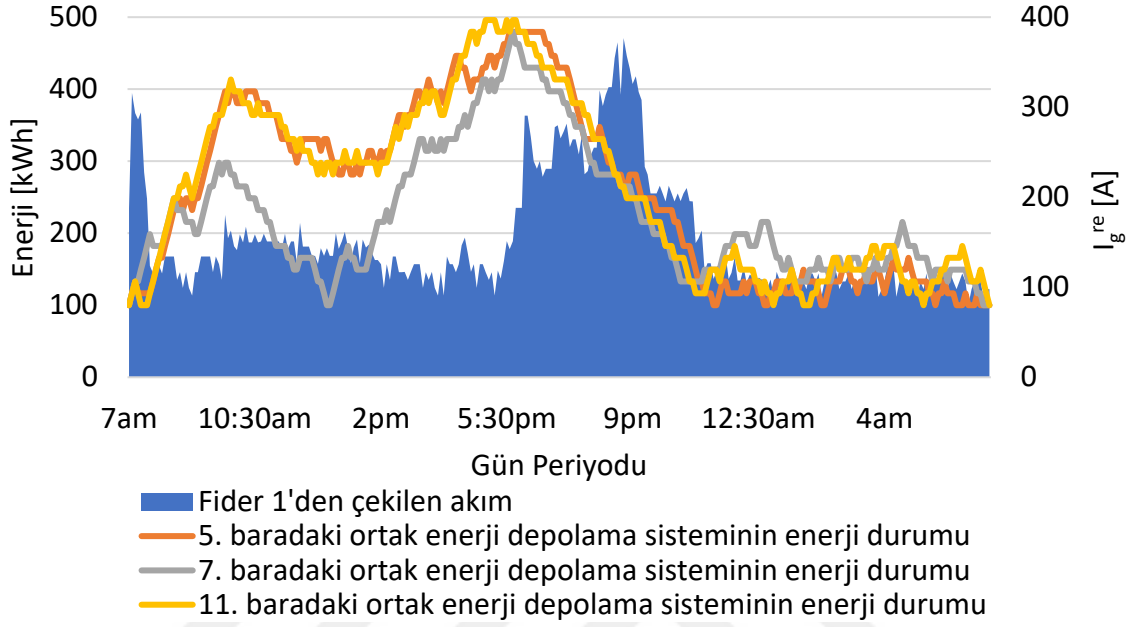
Sonuçların daha iyi karşılaştırılması açısından, 18:00 ile 22:30 saatleri arasında her üç senaryonun da yer aldığı şebekeden çekilen aktif akım değerleri Şekil 4.11’de verilmiştir. 18:00 ile 22:30 saatleri arası şebekeden Senaryo 1’de 79.36 MWh, Senaryo 2’de 78.43 MWh, Senaryo 3’te 75.83 MWh enerji çekilmiştir. Pik saatlerde şebekeden çekilen enerjinin en çok enerji depolama kapasiteleri büyük olan Ortak Enerji Depolama Sistemi 2’lerin yer aldığı Senaryo 3’te azaldığı görülmüştür.



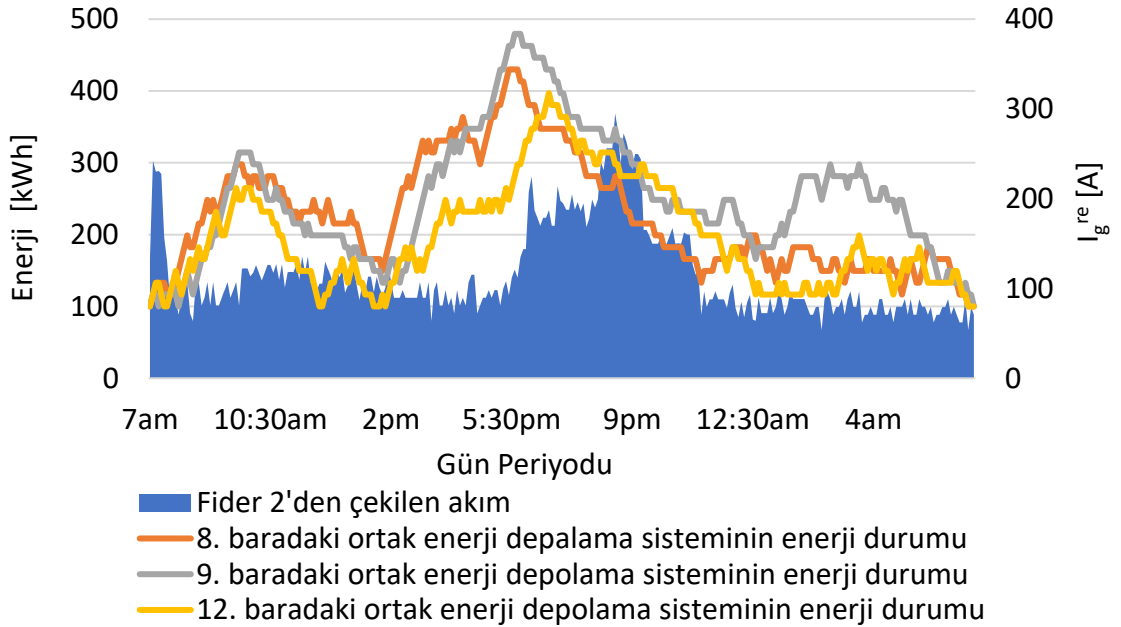
Şekil 4. 11 Senaryolarda şebekeden çekilen aktif akım değerleri

Senaryo 3’te Fider 1, Fider 2 ve Fider 3’ten çekilen aktif akımlar ve o fiderde yer alan ortak enerji depolama sistemlerinin enerji durumları ise sırasıyla Şekil 4.12, Şekil 4.13 ve Şekil 4.14’te verilmiştir. Her fider için ortak enerji depolama sistemleri pik yükü ve hat kayıplarını azaltmak için benzer karakteristikte bir çalışma göstermiştir. Burada ortak

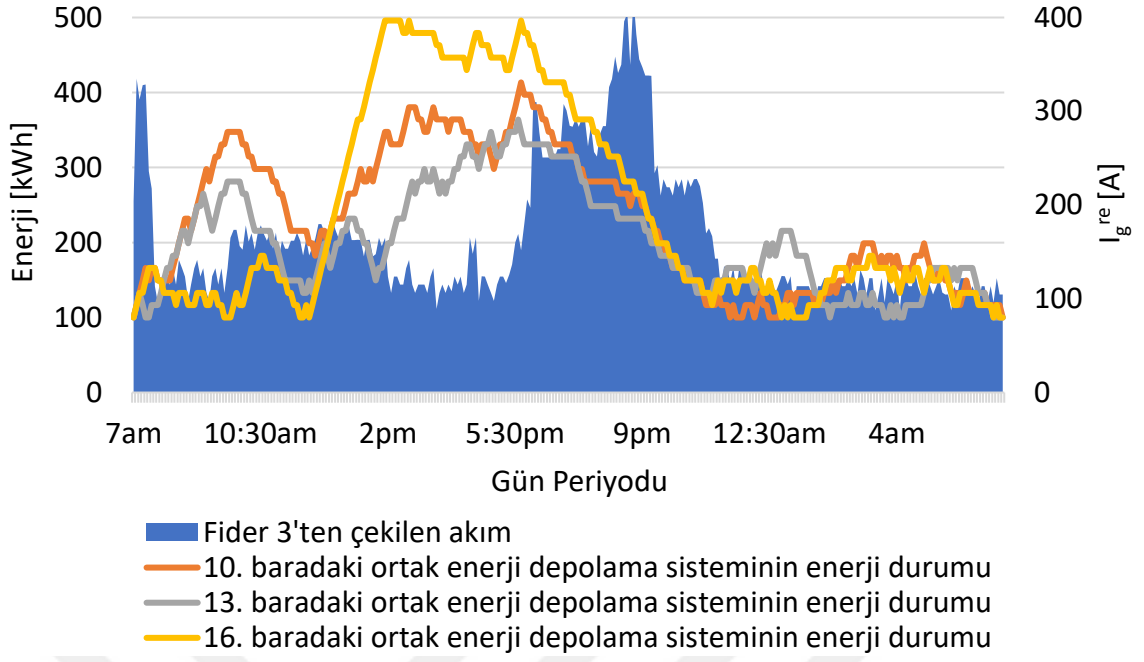
enerji depolama sistemlerinin enerji durumlarına bakıldığında, bazı depolama sistemlerinin enerji kapasitelerinin tamamını kullanmadığı görülmektedir. Bu nedenle, ekonomik açıdan optimum ortak enerji depolama sistemi boyutunun belirlenmesi de önemli bir konudur.



Şekil 4. 12 Senaryo 3'te Fider 1'den akan akım ve bu fiderde yer alan ortak enerji depolama sistemlerinin enerji durumları



Şekil 4. 13 Senaryo 3'te Fider 2'den akan akım ve bu fiderde yer alan ortak enerji depolama sistemlerinin enerji durumları



Şekil 4. 14 Senaryo 3'te Fider 3'den akan akım ve bu fiderde yer alan ortak enerji depolama sistemlerinin enerji durumları

Senaryolardan elde edilen sonuçlara göre; baralara yerleştirilen ortak enerji depolama sistemlerinin boyutları sıkıştırılmış hava enerji depolama sistemleri ve pompalanmış su enerji depolama sistemleri ile karşılaştırıldığında oldukça küçük olmalarına rağmen, şebekede özellikle hat kayıplarının azaltılması açısından olumlu sonuçlar vereceği görülmüştür. Ayrıca, optimum boyutlara dikkat edilerek enerji kapasitelerinin artırılması ya da buna eşdeğer baralardaki ortak enerji depolama sistemlerinin sayısının artırılması ile hatlarda meydana gelen kayıplar daha da azaltılabilir ve pik enerjinin azaltılmasına daha çok yardımcı olunabilir.

Bir ortak enerji depolama sisteminin maliyeti 1.000 TL/kWh olarak alınırsa Senaryo 2 için 9 adet 250 kWh'lik ortak enerji depolama sisteminin toplam maliyeti 2.250.000 TL olacaktır. Elde edilen sonuçlara göre bir günlük bir zaman dilimi için Senaryo 2'de Senaryo 1'e göre hat kayıpları 54,91 kWh azaltılmıştır. Bu sonuç ile bir senede yaklaşık olarak 20,042 MWh enerji tasarrufu sağlanmış olur. Ayrıca pik saatlerde enerjinin bir kısmı ortak enerji depolama sistemlerinden sağlanacağı için elektrik birim fiyatının yüksek olduğu pik enerji santrallerinden enerji alınmayacaktır.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, enerji depolama sistemlerinden özellikle şebekedeki aktif güç kayıplarının azaltılması amacıyla birden çok tüketiciye hizmet eden ve elektrik şirketi sahipliğinde olan ortak enerji depolama sistemleri hakkında bilgi verilmiştir. AC bir güç şebekesinde baralara ortak enerji depolama sistemlerinin yerleştirilmesi ile şebekedeki aktif güç kayıplarının minimize edilmesini hedefleyen bir uygulama gerçekleştirilmiştir. Önerilen modelde AC bir şebekenin güç akışı ve ortak enerji depolama sistemi denklemlerinin MILP modeli yer almaktadır. İlk olarak, önerilen modelin güç akışı kısmının doğruluğu bir test sisteminde belirlenmiştir. Daha sonra, yine aynı test sistemindeki hat verileri kullanılarak ortak enerji depolama sistemlerinin de yer aldığı bir uygulama gerçekleştirilmiştir. Modelde aktif güç kaybı, dağıtım hatlarında meydana gelen kablo kayıpları ve ortak enerji depolama sistemi kayıplarından oluşmaktadır ve sisteme enjekte edilen toplam aktif güç ile sistemde tüketilen toplam aktif güç arasındaki farkın bulunması ile belirlenmektedir. Ayrıca, ortak enerji depolama sistemlerinde genellikle lityum-iyon tercih edilen ve ideal olmaması sebebi ile şarj ve deşarj sırasında kayıplar oluşturan bataryaların şarj ve deşarj verimlilikleri de hesaba katılmıştır. Bataryaların şarj ve deşarj verimlilikleri ne kadar yüksek olursa ortak enerji depolama sistemi ve dolayısıyla güç sistemindeki kayıplar bir o kadar az olacaktır. Ayrıca, ortak enerji depolama sistemlerinin optimum yerinin ve boyutunun belirlenmesi de ekonomik açıdan önemli bir konudur.

Elde edilen sonuçlara göre; baralara yerleştirilen, elektrik şirketi sahipliğinde olan ve belirli bir evsel tüketici grubunun hizmetine sunulan ortak enerji depolama sistemlerinin hatlarda meydana gelen aktif güç kayıplarını azalttığı, pik yükün azaltılmasına yardımcı

olduğu ve pik yükün azaltılması ile yük düzeltme yaptığı görülmüştür. Elde edilen bu sonuçların dışında, ortak enerji depolama sistemleri birçok akıllı güç sistemi elemanını barındıran akıllı şebeke yapılarında hem tüketicilere hem de elektrik şirketlerine ekonomik açıdan faydalı sonuçlar getirecek başka uygulamalarda da değerlendirilebilir. Ortak enerji depolama sistemleri tekli olarak kullanıldığında evsel tüketicilerin sahip olduğu ve stokastik bir güç üretimi yapısına sahip olan yenilenebilir enerji kaynaklarının güç sistemlerine kolay entegre edilmesine yardımcı olurken, birden çok ortak enerji depolama sistemi birarada kullanıldığında ise güç sistemine güç kalitesinin artırılması, rezerv kapasitesi sağlama, frekans değerinin düzenlenmesi, gerilim düşümünün azaltılması hizmeti sunabilmektedir. Ayrıca şebekeden bağımsız olarak da çalışabilmektedir. Rüzgâr ve güneş gibi yenilenebilir enerji kaynakları ile bağlantılı olan ortak enerji depolama sistemleri bir yandan bu yenilenebilir enerji kaynaklarının güç sistemine entegrasyonunu kolaylaştırırken diğer yandan da elektrik maliyetini düşürme şansı sunabilmektedir. Elektrik şirketleri açısından ise, pik yükün azaltılması sonucunda transformatörler ve hatlardaki yükün azaltılması ile yatırım maliyetlerinin ertelenmesini ve kayıpların azaltılması ile ekonomik açıdan tasarruflar sağlayabilmektedir. Dünyada özellikle ABD’de birçok eyalette bu depolama sistemlerinin uygulanmış örneklerine rastlanırken, bu sistemlerin akıllı şebeke konsepti içerisinde daha birçok açıdan kazanç getireceği açıktır. Ayrıca bu sistemlere gösterilen ve günden güne artan ilgi, elde edilecek kazançlarla beraber bu sistemlerin gelişmiş ülkelerde olduğu kadar gelişmekte olan ülkelerde de talep görmesini sağlayacaktır ve bu sistemlerin şebekelerde yer alması için belirli standartlar getirilecektir.

Oluşturulan model tüketicilerin de üretici olarak katılabildiği ve birçok güç sistemi elemanını barındıran, güç akışının iki yönlü olabildiği akıllı şebeke yapısı içerisinde talep cevabı uygulamalarının, rüzgâr, güneş gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının, diğer tür enerji depolama sistemlerinin, akıllı evlerin, elektrikli araçların, vb. elemanların dahil edilmesi ile gelecekte gerçekleştirilebilecek çeşitli uygulamalarla genişletilebilir ve daha birçok farklı spesifik uygulamalara da adapte edilebilir. Ortak enerji depolama sistemlerini içeren bir güç sisteminde bahsedilen bu uygulamaların da gerçekleştirilmesi durumunda pik saatlerdeki enerji talebi ve şebeke kayıpları daha çok azaltılabilir, sistem verimliliği artırılabilir ve başta ekonomik olmak üzere çeşitli kazançlar elde edilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Rahbar, K., Moghadam, M.R.V., Panda, S.K., Reindl, T., (2016). "Shared Energy Storage Management for Renewable Energy Integration in Smart Grid", IEEE Innovative Smart Grid Technologies (ISGT) Conference, 6-9 Eylül 2016, Minneapolis.
- [2] Rahbar, K., Moghadam, M.R.V., Reindl, T., (2016). "Energy Management for Demand Responsive Users with Shared Energy Storage System", IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm), 6-9 Kasım 2016, Sidney.
- [3] Paridari, K., Parisio, A., Sandberg, H., Johansson, K.H., (2015). "Demand Response for Aggregated Residential Consumers with Energy Storage Sharing", 2015 IEEE 54th Annual Conference on Decision and Control (CDC), 15-18 Aralık 2015, Osaka.
- [4] Mediawaththe, C.P., Stephens, E.R., Smith, D.B., Mahanti, A., (2016). "A Dynamic Game for Electricity Load Management in Neighborhood Area Networks", IEEE Transactions on Smart Grid, 7 (3): 1329-1336.
- [5] Huq, K.M.M., Baran, M.E., Lukic, S., Nare, O.E., (2012). "An Energy Management System for a Community Energy Storage System", IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 15-20 Eylül 2012, Raleigh, 2759-2763.
- [6] Dimitrov, P., Piroddi, L., Prandini, M., (2016). "Distributed Allocation of a Shared Energy Storage System in a Microgrid", American Control Conference (ACC), 6-8 Temmuz 2016, 3551-3556.
- [7] Wang, Z., Gu, C, Li, F., Bale, P., Sun, H., (2013). "Active Demand Response Using Shared Energy Storage for Household Energy Management", IEEE Transactions on Smart Grid, 4 (4): 1888-1897.
- [8] Yao, J., Venkatasubramaniam, P., (2015). "Optimal End User Energy Storage Sharing in Demand Response", 2015 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2-5 Kasım 2015, Miami, 175-180.
- [9] Hung, D.Q., Mithulanathan, N., (2011). "Community Energy Storage and Capacitor Allocation in Distribution Systems", Power Engineering Conference (AUPEC), 25-28 Eylül 2011, Brisbane.

- [10] Parra, D., Norman, S.A., Walker, G.S., Gillott, M., (2016). "Optimum Community Energy Storage System for Demand Load Shifting", *Applied Energy*, 174: 130-143.
- [11] Thomas, P.R., Walker, J.T.J., McCarthy, C.A., (2012). "Demonstration of Community Energy Storage Fleet for Load Levelling, Reactive Power Compensation and Reliability Improvement", *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 22-26 Temmuz 2012, San Diego.
- [12] Arghandeh, R., Woyak, J., Onen, A., Jung, J., Broadwater, R.P., (2014). "Economic Optimal Operation of Community Energy Storage systems in Competitive Energy Markets", *Applied Energy*, 135: 71-80.
- [13] Bayram, I.S., Tajer, A., Abdallah, M., Qaraq, K., "Energy Storage Sizing for Peak Hour Utility Applications", 2015 *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 8-12 Haziran 2015, Londra, 770-775.
- [14] Bayram, I.S., Abdallah, M., Tajer, A., Qaraq, K.A., (2015). "A Stochastic Sizing Approach for Sharing-Based Energy Storage Applications", *IEEE Transactions on Smart Grid*, 8 (3): 1075-1084.
- [15] Wang, W., Liang, H., Chen, J., (2016). "Stochastic Modelling of Community Energy Storage System based on Diffusion Approximation", *IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM)*, 17-21 Temmuz 2016, Boston.
- [16] Van de Ven, P.M., Hegde, N., Massoulié, L., Salonidis, T., (2013). "Optimal Control of End-User Energy Storage", *IEEE Transactions On Smart Grid*, 4 (2): 789-797.
- [17] Roberts, B.P., Sandberg, C., (2011). "The Role of Energy Storage in Development of Smart Grids", *Proceedings of the IEEE*, 99 (6) :1139-1144.
- [18] Miller, T., Edmonds, M., (2013). "Energy Storage Can Enable Wider Deployment Of Distributed Generation", 22nd *International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED)*, 10-13 Haziran 2013, Stocholm.
- [19] Black, C.R., (2016). "Key Considerations for Deploying Storage at the Edge of the Grid", 2016 *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D)*, 3-5 Mayıs 2016, Dallas.
- [20] Sardi, J., Mithulanathan, N., (2014). "Community Energy Storage: A Critical Element in Smart Grid: A Review of Technology, Prospect, Challenges and Opportunity", 4th *International Conference on Engineering Technology and Technopreneuship (ICE2T)*, 27-29 Ağustos 2014, Kuala Lumpur, 125-130.
- [21] Zhu, W., Garrett, D., Butkowski, J, Wang, Y., (2012). "Overview of Distributive Energy Storage Systems for Residential Communities", *IEEE Energytech*, 29,31 Mayıs 2012, Cleveland.
- [22] U.S. Energy Information Administration (EIA), *International Energy Outlook 2017*, [https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484\(2017\).pdf](https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484(2017).pdf), 14 Aralık 2017.
- [23] Dell, R.M., Rand, D.A.J., (2001), "Energy Storage – A Key Technology for Global Energy Sustainability", *Journal of Power Sources*, 100 (1-2): 2-17.

- [24] Vazquez, S., Lukic, S.M., Galvan, E., Franquelo, L.G., Carrasco, J.M, (2010). "Energy Storage Systems for Transport and Grid Applications", IEEE Transactions on Industrial Electronics, 57 (12): 3881-3895.
- [25] Styczynski, Z.A., Lombardi, P., Seethapathy, R., Piekutowski, M., Ohler, C., Roberts, B., Verma, S.C., (2009). "Electric Energy Storage and its Tasks in the Integration of Wide-Scale Renewable Resources", CIGRE/IEEE PES Joint Symposium, 29-31 Temmuz 2009, Calgary.
- [26] Riberio, P.F., Johnson, B.K., Crow, M.L., Arsoy, A., Liu, Y., (2001). "Energy Storage Systems for Advanced Power Applications", Proceedings of the IEEE, 89 (12): 1744-1756.
- [27] Erdinç, O., Uzunoglu M., Vural, B., (2011). "Hibrit Alternatif Enerji Sistemlerinde Kullanılan Enerji Depolama Üniteleri", Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu, 5-7 Ekim 2011, Elazığ, 116-121.
- [28] Manbachi, M., Farhangi, H., Palizban, A., Arzanpour, S., (2016). "Community Energy Storage Impacts on Smart Grid Adaptive Volt-VAR Optimization of Distribution Networks", Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), 2016 IEEE 7th International Symposium, 27-30 Haziran 2016, Vancouver.
- [29] American Electric Power (AEP), Functional Specification For Community Energy Storage (CES) Unit, Revision: 2.2, http://www.dolantechcenter.com/Focus/DistributedEnergy/docs/CESUnitSpecifications_rev2_2.pdf, 09.01.2018.
- [30] Thomas, P.R, American Electric Power Community Energy Storage, https://www.smartgrid.gov/files/American_Electric_Power_Community_Energy_Storage_201109.pdf, 12.01.2018.
- [31] Paterakis, N., (2015). Reserve Services Provision by Demand Side Resources in Systems with High Renewables Penetration Using Stochastic Optimization, Doktora Tezi, University of Beira Interior Faculdade Engenharia, Covilha.
- [32] Ecamion Power Over Energy, Pole Mounted Community Energy Storage, <http://www.ecamion.com/ecamion-commissions-worlds-first-pole-mounted-community-energy-storage-in-toronto>, 12.01.2018.
- [33] Ferreira, R.S., (2013). A Mixed-Integer Linear Programming Approach to the AC Optimal Power Flow in Distribution Systems, Yüksek Lisans Tezi, UFRJ COPPE, Rio de Janeiro.
- [34] Ferreira, R.S., Borges, C.L.T., Pereira, M.V.F., (2013). "Distribution Network Reconfiguration under Modeling of AC Optimal Power Flow Equations: A Mixed-Integer Programming Approach", 2013 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Latin America (ISGT LA), 15-17 Nisan 2013, Sao Paulo.
- [35] Ferreira, R.S., Borges, C.L.T., Pereira M.V.F., (2014). "A Flexible Mixed-Integer Linear Programming Approach to the AC Optimal Power Flow in Distribution Systems", IEEE Transactions on Power Systems, 29 (5): 2447-2459.

- [36] Erdiñç, O., Paterakis, N.G., Mendes, T.D.P., Bakirtzis, A.G., Catalão, J.P.S., (2015). "Smart Household Operation Considering Bi-Directional EV and ESS Utilization by Real-Time Pricing-Based DR", IEEE Transactions on Smart Grid, 6 (3): 1281-1291.
- [37] Civanlar, S., Grainger, J.J., Yin, H., Lee, S.S.H., (1988). "Distribution Feeder Reconfiguration For Loss Reduction", IEEE Transactions on Power Delivery, 3 (3): 1217-1223.
- [38] Borghetti, A., (2012). "A Mixed-Integer Linear Programming Approach for the Computation of the Minimum-Losses Radial Configuration of Electrical Distribution Networks", IEEE Transactions on Power Systems, 27 (3): 1264-1273.



ÖNERİLEN KARIŞIK TAMSAYILI DOĞRUSAL MODELİNİN GAMS KODLARI

ŞCALL GDXXRW alpercicektez.xlsx Index=ParamsAndSets!A1

ŞGDXXIN alpercicektez.gdx

Set

t zaman

k baralar(1-16)

m baralar(1-16)

r /1*5/

s /1*9/

l /1*5/

U /1*5/

g /1*3/

OEDSdat;

ŞLOAD t k m OEDSdat

display t,k,m,r,s,l,U,OEDSdat;

Parameters

Vmax(k)

Vmin(k)

dP(t,k)

dQ(t,k)

b2(k,m)

b3(m,k)

b4(k) ortak enerji dep sis. olan baralar

Rd(k,m)

Xd(k,m)

Ed(r,s)

Jd(r,s)

Imaxkm(k,m)

Vd(r,s)

Vdre(r)

Vdim(s)

idredeger(I)

idr(I,U)

idimdeger(U)

OEDSdata(OEDSdat);

LOAD b2 b3 b4 Rd Xd Ed Jd Imaxkm Vmax Vmin Vd Vdre Vdim idredeger dP dQ idr
idimdeger OEDSdata

display b2, b3, b4, Rd, Xd, Ed, Jd, Imaxkm, Vmax, Vmin, Vd, Vdre, Vdim, idredeger, dP,
dQ, idr, idimdeger, OEDSdata;

Variables

losses

Igre(t,k)

Igim(t,k)

Idre(t,k)

Idim(t,k)

iikm

Irekm

limkm

E(t,k)

J(t,k)

Vre

Vim

V

iirekm

iiimkm

P_OEDS_ch(t,k)

P_OEDS_dis(t,k)

I_OEDS_ch(t,k)

I_OEDS_dis(t,k)

OEDS_SOE(t,k)

I_OEDS_chs(t,k)

I_OEDS_diss(t,k);

Positive Variables Vre, E, V, iirekm, Idre, Irekm, Igre, iikm, P_OEDS_ch, P_OEDS_dis, I_OEDS_ch, I_OEDS_dis, OEDS_SOE, I_OEDS_chs, I_OEDS_diss;

SOS2 Variables L1(t,k,r,s), wkm(t,k,m,I,U);

Binary Variable u_OEDS(t,k),u_OEDS2(t,k);

Scalars

Vref /23000/

cosQref /1/

sinQref /0/;

Equations

Objective

Kirchhoff1

Kirchhoff2

Kirchhoff3

Kirchhoff4

Bara_enjeksiyonlari1

Bara_enjeksiyonlari2

Bara_enjeksiyonlari3

Bara_enjeksiyonlari4

Bara_enjeksiyonlari5

Bara_enjeksiyonlari6

Bara_enjeksiyonlari7

Bara_enjeksiyonlari8

Bara_enjeksiyonlari9

Bara_gerilim_sinirlari1

Bara_gerilim_sinirlari2

Bara_gerilim_sinirlari3

Dal_akimlari1
Dal_akimlari2
Dal_akimlari3
Dal_akimlari4
Dal_akimlari5
Dal_akimlari6
Dal_akimlari7
Dal_akimlari8
Dal_akimlari9
Referans_bara1
Referans_bara2
OEDS_charging
OEDS_discharging
OEDS1
OEDS2
OEDS3
OEDS4
OEDS5
OEDS6
OEDS7
OEDS8
OEDS9
OEDS10
OEDS11
OEDS12
OEDS13
OEDS14
OEDS15
OEDS16
OEDS17
OEDS_SOE_eq
OEDS_SOE_ini
OEDS_SOE_max

OEDS_SOE_min;

Objective ..

losses = e= sum((t,k), lgre(t,k)*Vref*0.001/12)-sum((t,k), dP(t,k)/12);

Kirchhoff1 (t,k) ..

ldre(t,k)+sum(m,lrekm(t,k,m)*b2(k,m))+(I_OEDS_chs(t,k))*b4(k) =e= lgre(t,k)+sum(m, lrekm(t,m,k)*b3(m,k))+I_OEDS_diss(t,k))*b4(k);

Kirchhoff2 (t,k) ..

ldim(t,k)+sum(m, limkm(t,k,m)*b2(k,m)) =e= lgim(t,k)+sum(m, limkm(t,m,k)* b3(m,k));

Kirchhoff3 (t,k,m) ..

Vre(t,k)*b2(k,m)-Vre(t,m)*b2(k,m) =e= lrekm(t,k,m)*Rd(k,m)*b2(k,m)-limkm(t,k,m)* Xd(k,m)*b2(k,m);

Kirchhoff4 (t,k,m) ..

Vim(t,k)*b2(k,m)-Vim(t,m)*b2(k,m) =e= lrekm(t,k,m)*Xd(k,m)*b2(k,m)+limkm(t,k,m)* Rd(k,m)*b2(k,m);

Bara_enjeksiyonlari1 (t,k) ..

ldre(t,k) =e= E(t,k)*dP(t,k)*1000+J(t,k)*dQ(t,k)*1000;

Bara_enjeksiyonlari2 (t,k) ..

ldim(t,k) =e= J(t,k)*dP(t,k)*1000-E(t,k)*dQ(t,k)*1000;

Bara_enjeksiyonlari3 (t,k) ..

E(t,k) =e= sum((r,s), L1(t,k,r,s)*Ed(r,s));

Bara_enjeksiyonlari4 (t,k) ..

J(t,k) =e= sum((r,s), L1(t,k,r,s)*Jd(r,s));

Bara_enjeksiyonlari5 (t,k) ..

Vre(t,k) =e= sum((r,s), L1(t,k,r,s)*Vdre(r));

Bara_enjeksiyonlari6 (t,k) ..

Vim(t,k) =e= sum((r,s), L1(t,k,r,s)*Vdim(s));

Bara_enjeksiyonlari7 (t,k) ..

sum((r,s), L1(t,k,r,s)) =e= 1;

Bara_enjeksiyonlari8 (t,k) \$ (ord(k)>3) ..

lgre(t,k) =e= 0;

Bara_enjeksiyonlari9 (t,k) \$ (ord(k)>3) ..

lgim(t,k) =e= 0;

Bara_gerilim_sinirlari1 (t,k) ..

Vmin(k) =l= V(t,k);

Bara_gerilim_sinirlari2 (t,k) ..

V(t,k) =l= Vmax(k);

Bara_gerilim_sinirlari3 (t,k) ..

V(t,k) =e= sum((r,s), L1(t,k,r,s)*Vd(r,s));

Dal_akimlari1 (t,k,m) ..

iirekm(t,k,m) =g= Irekm(t,k,m);

Dal_akimlari2 (t,k,m) ..

iirekm(t,k,m)=g= -Irekm(t,k,m);

Dal_akimlari3 (t,k,m) ..

iiimkm(t,k,m)=g= limkm(t,k,m);

Dal_akimlari4 (t,k,m) ..

iiimkm(t,k,m)=g= -limkm(t,k,m);

Dal_akimlari5 (t,k,m) ..

sum((l,U), wkm(t,k,m,l,U)*idr(l,U)) =e= iikm(t,k,m);

Dal_akimlari6 (t,k,m) ..

sum((l,U), wkm(t,k,m,l,U)*idredeger(l)) =e= iirekm(t,k,m);

Dal_akimlari7 (t,k,m) ..

sum((l,U), wkm(t,k,m,l,U)*idimdeger(U)) =e= iiimkm(t,k,m);

Dal_akimlari8 (t,k,m) ..

sum((l,U), wkm(t,k,m,l,U))*b2(k,m) =e= 1*b2(k,m);

Dal_akimlari9 (t,k,m) ..

iikm(t,k,m) =l= 750;

Referans_bara1 (t,g) ..

$V_{re}(t,g) = e = V_{ref} \cdot \cos Q_{ref};$

Referans_bara2 (t,g) ..

$V_{im}(t,g) = e = V_{ref} \cdot \sin Q_{ref};$

OEDS_charging (t,k) ..

$I_{OEDS_ch}(t,k) = e = E(t,k) \cdot 1000 \cdot OEDSdata('CR_OEDS') \cdot b4(k);$

OEDS_discharging (t,k) ..

$I_{OEDS_dis}(t,k) = l = E(t,k) \cdot OEDSdata('DR_OEDS') \cdot 1000 \cdot b4(k) \cdot OEDSdata('DE_OEDS');$

OEDS1 (t,k) ..

$I_{OEDS_diss}(t,k) = l = 10000000000000000 \cdot (u_{OEDS}(t,k)) \cdot b4(k);$

OEDS2 (t,k) ..

$I_{OEDS_diss}(t,k) = l = I_{OEDS_dis}(t,k) \cdot b4(k);$

OEDS3 (t,k) ..

$I_{OEDS_diss}(t,k) = g = I_{OEDS_dis}(t,k) \cdot b4(k) - (1 - (u_{OEDS}(t,k))) \cdot 10000000000000000;$

OEDS4 (t,k) ..

$I_{OEDS_diss}(t,k) = g = 0;$

OEDS5 (t,k) ..

$I_{OEDS_chs}(t,k) = l = 10000000000000000 \cdot (u_{OEDS2}(t,k)) \cdot b4(k);$

OEDS6 (t,k) ..

$I_{OEDS_chs}(t,k) = l = I_{OEDS_ch}(t,k) \cdot b4(k);$

OEDS7 (t,k) ..

$I_{OEDS_chs}(t,k) = g = I_{OEDS_ch}(t,k) \cdot b4(k) - (1 - (u_{OEDS2}(t,k))) \cdot 10000000000000000 \cdot b4(k);$

OEDS8 (t,k) ..

$I_{OEDS_chs}(t,k) = g = 0;$

OEDS9 (t,k) ..

$P_{OEDS_dis}(t,k) = l = 10000000000000000 \cdot (u_{OEDS}(t,k)) \cdot b4(k);$

OEDS10 (t,k) ..

$P_{OEDS_dis}(t,k) = l = OEDSdata('DR_OEDS') \cdot OEDSdata('DE_OEDS') \cdot b4(k);$

OEDS11 (t,k) ..
P_OEDS_dis(t,k) =g= OEDSdata('DR_OEDS')*OEDSdata('DE_OEDS')*b4(k)-(1-(u_OEDS(t,k))) * 1000000000000000;

OEDS12 (t,k) ..
P_OEDS_dis(t,k) =g= 0;

OEDS13 (t,k) ..
P_OEDS_ch(t,k) =l= 1000000000000000*(u_OEDS2(t,k))*b4(k);

OEDS14 (t,k) ..
P_OEDS_ch(t,k) =l= OEDSdata('CR_OEDS')*b4(k);

OEDS15 (t,k) ..
P_OEDS_ch(t,k)=g=OEDSdata('CR_OEDS')*b4(k)-(1-u_OEDS2(t,k))*1000000000000000*
b4(k);

OEDS16 (t,k) ..
P_OEDS_ch(t,k) =g= 0;

OEDS17 (t,k) ..
u_OEDS(t,k)*b4(k)+(u_OEDS2(t,k))*b4(k) =l= 1*b4(k);

OEDS_SOE_eq (t,k) \$(ord(t)>1) ..
OEDS_SOE(t,k) =e= OEDS_SOE(t-1,k)*b4(k)+OEDSdata('CE_OEDS')*
(P_OEDS_ch(t,k)/12)*b4(k)-(P_OEDS_dis(t,k)/12)*b4(k);

OEDS_SOE_ini (t,k) \$(ord(t)=1) ..
OEDS_SOE(t,k) =e= OEDSdata('SOE_OEDS_ini')*b4(k);

OEDS_SOE_max (t,k) ..
OEDS_SOE(t,k) =l= OEDSdata('SOE_OEDS_max')*b4(k);

OEDS_SOE_min (t,k) ..
OEDS_SOE(t,k) =g= OEDSdata('SOE_OEDS_min')*b4(k);

model guc_akisi_OEDS2 /all/;

option mip=CPLEX;

option optcr =0;

```
option reslim = 1000000;
```

```
solve guc_akisi_OEDS using mip minimizing losses;
```



ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Alper ÇİÇEK
Doğum Tarihi ve Yeri : 17.04.1992, Edirne
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : f4915001@std.yildiz.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU

| Derece | Alan | Okul/Üniversite | Mezuniyet Yılı |
|--------|-----------------------|----------------------|----------------|
| Lisans | Elektrik Mühendisliği | Kocaeli Üniversitesi | 2014 |
| Lise | Fen Bilimleri | Edirne Lisesi | 2010 |

İŞ TECRÜBESİ

| Yıl | Firma/Kurum | Görevi |
|------|------------------------------|--------------------|
| 2014 | Edtaş İnş. Taah. | Elektrik Mühendisi |
| 2013 | Tübitak MAM Enerji Enstitüsü | Stajyer |
| 2012 | Murat Makina | Stajyer |

YAYINLARI

Bildiri

1. Çiçek, A., Şengör, İ., Erdiñç, O., (2017). "Ortak Enerji Depolama Sistemlerinin Elektrik Güç Sistemlerinde Talep Cevabı Konsepti İçin Kullanılması", Elektrik-Elektronik Mühendisliği Kongresi (EEMKON 2017), 16-18 Kasım 2017, İstanbul.

