



IJEASED

INTERNATIONAL JOURNAL OF EASTERN ANATOLIA
SCIENCE ENGINEERING AND DESIGN

Uluslararası Doğu Anadolu Fen Mühendislik ve Tasarım Dergisi
ISSN: 2667-8764 , 5(1), 31-54, 2023
<https://dergipark.org.tr/tr/pub/ijeased>



Araştırma Makalesi / *Research Article*

Doi: [10.47898/ijeased.1247046](https://doi.org/10.47898/ijeased.1247046)

Mikro Şebekeler için Enerji Yönetimi ve Gerilim Kontrol Algoritmalarının Geliştirilmesi: Alçak Gerilim Seviyesinde Statik Voltaj Regülatörü Örneği

Enes BEKTAŞ^{1,2*}, Kamil Çağatay BAYINDIR², Alper TERCİYANLI³, Adnan TAN⁴,
Hüseyin CANBOLAT², Hasan YILMAZ⁵





¹ Çankırı Karatekin Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Çankırı, 18100, Türkiye.

² Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Ankara, 06010, Türkiye.

³ İnavitas Enerji, Ankara, 06560, Türkiye.

⁴ Çukurova Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Adana, 01250, Türkiye.

⁵ Fırat Elektrik Dağıtım A. Ş., Elazığ, 23040, Türkiye.

Yazar Kimliği / <i>Author ID (ORCID Number)</i>	Makale Süreci / <i>Article Process</i>
*Sorumlu Yazar / <i>Corresponding author</i> : enesbektas@karatekin.edu.tr  https://orcid.org/0000-0002-8380-4519 , E. Bektaş  https://orcid.org/0000-0002-9413-5162 , K. Ç. Bayındır  https://orcid.org/0000-0003-2671-2615 , A. Terciyanlı  https://orcid.org/0000-0002-5227-2556 , A. Tan  https://orcid.org/0000-0002-2577-0517 , H. Canbolat  https://orcid.org/0000-0002-5420-6456 , H. Yılmaz	Geliş Tarihi / <i>Received Date</i> : 03.02.2023 Revizyon Tarihi / <i>Revision Date</i> : 18.03.2023 Kabul Tarihi / <i>Accepted Date</i> : 25.03.2023 Yayın Tarihi / <i>Published Date</i> : 15.07.2023

Alıntı / *Cite* : Bektaş, E., Bayındır, K. Ç., Terciyanlı, A., Tan, A., Canbolat, H., Yılmaz, H. (2023). Mikro Şebekeler için Enerji Yönetimi ve Gerilim Kontrol Algoritmalarının Geliştirilmesi: Alçak Gerilim Seviyesinde Statik Voltaj Regülatörü Örneği, Uluslararası Doğu Anadolu Fen Mühendislik ve Tasarım Dergisi , 5(1), 31-54.

Özet

Son yıllarda dağıtık enerji üretiminin artması ile birlikte alçak gerilim (AG) tarafta, tüketici geriliminde yükselmeler meydana gelmektedir. Aynı zamanda ters güç akışı, şebeke dengesizliği gibi problemler ile birlikte gerilimdeki yükselme, enerji hatları üzerinde kayıplara yol açarak sistemi veriminin düşmesine neden olmaktadır. Bu makalede, AG mikro şebekeler için gerilim problemlerinin çözümüne yönelik, mikro şebeke önüne statik voltaj regülatörü (SVR) bağlanmıştır ve SVR gerilim kontrol algoritması geliştirilmiştir. Gerilim kontrol algoritmasının mikro şebeke için önerilen Kural Tabanlı ve Optimizasyon Tabanlı Enerji Yönetimi Sistemleri (EYS) ile birlikte uygulanmasına yönelik benzetim çalışması yapılmıştır. IEEE 13 bara test sistemi ve önerilen algoritmalar Simulink/MATLAB ortamında oluşturulmuştur. Optimizasyon tabanlı EYS sonuçları, Python programlama dili kullanılarak elde edilmiştir. Gerçek gerilim ve yük profili otomatik sayaç okuma sistemi (OSOS) verilerinden alınmıştır ve elde edilen sonuçlar SVR

gerilim kontrol algoritmasının, mikro şebekelerinin gerilimini istenilen seviyeye indirilmesinde etkili bir şekilde kullanılabileceğini göstermiştir. Aynı zamanda Optimizasyon Tabanlı EYS ile mikro şebekelerin daha efektif bir şekilde yönetilebileceği benzetim çalışması sonuçları ile doğrulanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Enerji Yönetim Sistemi (EYS), Gerilim Regülasyonu, Mikro Şebeke, Optimizasyon.

Development of Energy Management and Voltage Control Algorithms for Microgrids: A Case Study with Static Voltage Regulator at Low Voltage Level

Abstract

Recently, with the increase in distributed energy production, consumers' voltage rises on the low voltage (LV) side. At the same time, problems such as reverse power flow and grid instability together with the increase in voltage cause power line losses, therefore system efficiency decreases. This paper proposes a static voltage regulator (SVR) voltage control algorithm to solve LV microgrids' voltage problems. A simulation study has been carried out for the implementation of a voltage control algorithm together with the Rule Based and Optimization Based Energy Management System (EMS). IEEE 13 Bus test system and proposed algorithms are modeled in Simulink/MATLAB. Results of Optimization Based EMS are obtained with Python programming language. Voltage and load profiles are obtained from automatic meter reading (AMR) data. Furthermore, results demonstrate that the SVR voltage control algorithm can be used effectively to reduce microgrids' voltage to the desired voltage level. Additionally, it has been proved by simulation results that microgrids can be managed more effectively with Optimization Based EMS.

Keywords: Energy Management System (EMS), Microgrid, Optimization, Voltage Regulation.

1. Giriş

Elektrik güç dağıtım sistemlerinde, akıllı şebekelerin sisteme dâhil olması ile değişimler olmaktadır. Son on yılda, büyük oranda güneş enerjisi kurulumu hem son müşteri hem de elektrik şebekesi için faydayı en üst düzeye çıkarma ihtiyacını doğurmuştur. Bu nedenle, esas olarak sistemin genel verimliliğini artırma zorluğuna odaklanan enerji yönetim sistemleri (EYS) üzerinde birçok çalışma yapılmıştır. Gerçek zamanlı EYS uygulamalarının amacı, ev aletlerini izleyerek yüklerin yönetilmesi üzerinde yoğunlaşarak sistem verimliliği maksimum düzeye çıkarabilmektedir.

Güneş enerjisi üretimi belli zaman aralıklarında, üreten-tüketiciler için tüketimin üzerine çıkabilmektedir. Bu durum düşük gerilimdeki dağıtım sistemlerinde ters güç akışına ve işletme geriliminde yükselmelere neden olmaktadır (Malekpour ve Nikham, 2011; Monika ve ark., 2012). Özellikle düşük tüketim durumunda, dağıtım sistemi operatörü (DSO) güneş enerjisi üretimini kısıtlamaktadır. Diğer bir çözüm ise dağıtım şebekesinin rezistif olmasından kaynaklı olarak aktif gücün azaltılmasıdır (Ramakrishna ve Rao, 1999).

EYS ile yönetilen bir mikro şebeke, dağıtım şebekesine bağlı olması nedeniyle şebekenin gerilimindeki dalgalanmalardan olumsuz bir şekilde etkilenebilir. Dağıtık üretimin artan bir şekilde şebekeye bağlanması ile dağıtım şebekesinde şu problemler ortaya çıkmaktadır:

- Yüksek üretim sürecindeki şebekede gerilim artışı

- Düşük talep güçte ters yönde güç akışının oluşması
- Güneş enerjisi üretimindeki dalgalanmalar neticesinde güç dengesizliğinin oluşması ve güç sisteminde frekans sapmaları (Bektaş ve ark., 2022)

Genel olarak dağıtım şebekesi gerilim profili ve reaktif güç akışı, trafo kademe değiştirici, voltaj regülatörü, statik senkron kompansatör ve batarya depolama sistemleri ile kontrol edilmektedir (Naina ve ark., 2017). Dağıtım şebekelerinde volt/var kontrolünü hedefleyen sistemlerin başlıca amacı, dağıtım fiderinin her noktasında gerilimin kabul edilebilir sınırlar içerisinde tutmaya çalışmaktır. Aynı zamanda, volt/var kontrolü ile sistem kayıplarını düşürerek verimin artırılması ve gerilimin düşmesini engelleyerek talebin düşürülmesi mümkündür (İbrahim ve Salama, 2015).

Literatür incelendiğinde, mikro şebeke çalışmaları EYS'yi ayrı bir şekilde inceleyen çalışmalar, EYS ve volt var optimizasyonu (VVO)'nun birlikte uygulandığı çalışmalar ve sadece VVO'nun uygulandığı çalışmalar şeklinde 3 grupta toplanabilir. EYS ve VVO'nun birlikte uygulandığı mikro şebeke çalışmaları sistem kararlılığının artırılması bakımından öne çıkmaktadır.

Sadece EYS üzerinde yoğunlaşan çalışmalar şu şekilde özetlenebilir: (Zafar ve ark., 2018), üreten-tüketici tabanlı bir EYS üzerinde çalışmıştır. Önerilen sistemin alçak gerilim (AG) seviyesindeki üreten-tüketiciler için maliyet ve enerji devamlılığı açısından önemli olduğu vurgulanmıştır. (Akter ve ark., 2017) belirli bir bölgede AG seviyesindeki güneş enerjisi panelleri ve batarya sistemlerini birlikte ve ayrı ayrı içeren birden çok kullanıcının bulunduğu ve bu kullanıcıları birbirleri ile enerjilerini paylaştıkları farklı durumlar senaryo edilmiştir mikro şebekenin yönetimi ile ilgili algoritmalar üzerinde çalışmıştır. (Hu, Liu ve ark., 2017) yaptıkları çalışmada enerji piyasası içerisinde dahil edilen mikro şebekeler için geliştirilen yöntemler üzerinde durulmuştur. (Hu, Shan ve ark., 2017), alternatif akım (AA) ve doğru akım (DA) mikro şebekelerin birlikte yönetilmesi ile ilgili çalışma yapmıştır. AA ve DA baranın şebekeye bağlı olarak çalışmasında farklı yüklenme ve üretim profillerinde birbirleri ile enerji paylaşmasının mümkün olduğu ve DA baranın daha az osilasyon ile geriliminde dalgalanmalar olduğu sonucuna varılmıştır. (Luna, Diaz, Graells ve ark., 2016)'da ise güneş enerjisi ve batarya depolama sistemi bulunan birden fazla üreten tüketici için mikro şebeke yönetimi üzerinde çalışılmıştır. Amaç fonksiyonu üreten tüketicilerin kontrol edilebilir yüklerine müdahale edilebileceği ve üreten tüketicinin ilk başta kendi enerjisini kullanmaya yöneltileceği şekilde tanımlanmıştır. (Luna, Diaz, Savaghebi ve ark., 2016) yapmış oldukları çalışmada, amaç fonksiyonunu şebekeden minimum enerji çekileceği ve güneş panellerinden üretilen gücün öncelikli olarak kullanılacağı, bataryanın ömrünün

etkilenmemesi için ikincil bir şekilde kullanılmasına için tanımlamış ve sistemi buna göre optimum çalıştırmıştır.

İstenilen regülasyon seviyesine ulaşıldığı ve hat kayıplarında azalmaların elde edildiği hususları VVO'nun tek başına çalışıldığı makalelerde ne çıkmaktadır. (Resener ve ark., 2019; Resener ve ark., 2019) yaptıkları çalışmada 23 ve 69-baralı test sistemi için Kapasite bankları, Voltaj Regülatörü, yük altında kademe değiştirici ve dağıtık üreticilerin devrede olduğu yada olmadığı durumları içeren farklı varyasyonları karışık tam sayılı doğrusal programlama (KTSDP), "mixed integer linear programming (MILP)", problemine göre formüle edilmiş ve CPLEX OLP programlayıcı kullanarak çözülmüştür. Sonuç olarak 23, 69-baralı sistemler için Kapasite bankları, Voltaj Regülatörü, yük altında kademe değiştirici ve dağıtık üreticilerin devrede olduğu varyasyonu içeren sistemin enerji kaybı ve kapasite için optimumu sağladığı görülmüştür. (Aryanezhad, 2018) yaptığı çalışmada, batarya enerji depolama sistemleri, anahtarlama şönt kapasitör, kademeli gerilim regülatörü, yük altında kademe değiştiricinin yer aldığı IEEE 123 test barası için sistemin 24 saatlik çalışmasına dair genetik algoritma (GA) tabanlı bir simülasyon yapmıştır. Aynı zamanda bu simülasyon sonuçlarını parçacık sürü optimizasyonu (PSO) temelli simülasyon sonuçları ile karşılaştırmış, GA'nın daha iyi sonuçlar verdiğini çıkarımına varmıştır. Tanımlanan amaç fonksiyonu ile enerji kayıplarının ve her baradaki gerilimin nominal değerinden sapmasının minimuma indirilmesi hedeflenmiş ve başarılı sonuçlar alınmıştır. (Long, 2019), volt-var optimizasyonu için yeni bir metot geliştirmiştir. Bu metot anahtarlama kapasite, yük altında kademe değiştirici ve akıllı invertörlerin birlikte devreye alınması için gerekli kontrol algoritmasını içermektedir. Kontrol metodunda bara gerilimi ve kontrol değişkenleri arasında matematiksel ilişkiyi içeren gerilim-yük hassasiyet matrisi tanımlanmaktadır. Aynı zamanda, tanımlanan amaç fonksiyonu ile de yük altında kademe değiştiricinin devreye girme sayısı ve her baradaki gerilimin nominal değerinden sapmasının minimuma indirilmesi hedeflenmiş ve başarılı sonuçlar alınmıştır. (Jafari ve ark., 2018) yaptıkları çalışmada, IEEE 13 test barasında birden çok güneş panellerinin ve akıllı invertörlerin olma durumunu incelemişlerdir. Akıllı invertörlerin GA tabanlı kontrolünü, ana fider gerilimindeki sapma, aktif güç kayıplarının minimize edilmesi, gerilim yükselmesi ve alçalması durumundaki akıllı invertör optimum reaktif güç kontrolü dikkate alarak gerçekleştirmişlerdir. Sonuç olarak IEEE 13 test sistemi için aktif güç kayıplarının minimize edilmesi ve volt/var kontrolünün etkili bir biçimde yapılabilirliğini kanıtlamışlardır.

EYS ve VVO'nun birlikte uygulandığı öne çıkan çalışmalarda önemli hususlar şunlardır: (Ranaweera ve ark., 2017)'de şebekeye bağlı güneş enerjisi ve batarya depolama sistemi bulunan

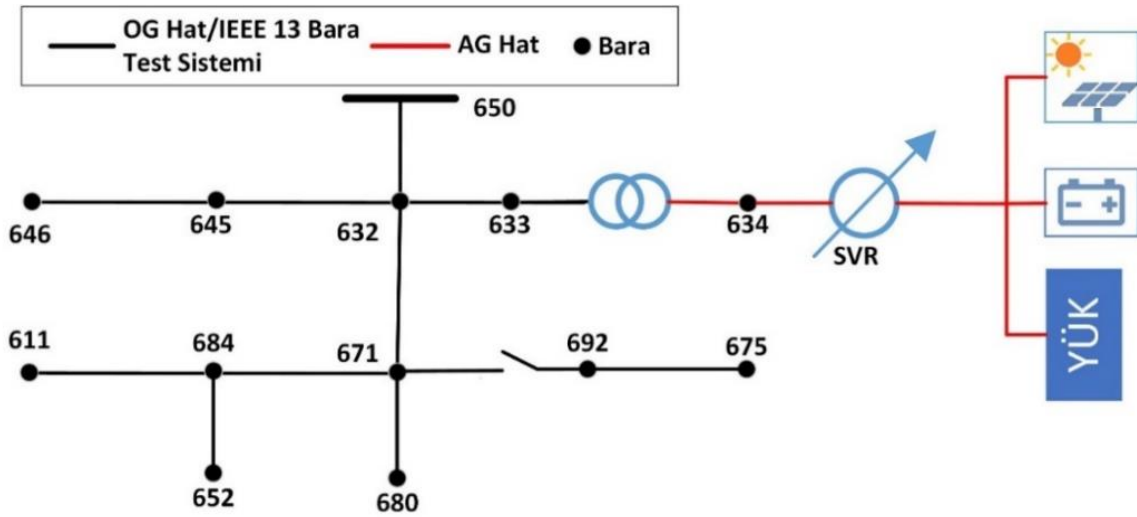
bir akıllı şebekenin, enerji yönetimi yapılırken güneş enerjisi ve batarya invertörlerinden reaktif set değeri ayarlanarak aşırı gerilim probleminin çözülmesi üzerinde başarılı sonuçlar alınmıştır. (Castro ve ark., 2020)'de batarya depolama sistemleri ve güneş enerji panelleri birden çok mikro şebekede farklı yerlere yerleştirilmiş, aynı zamanda EYS ve VVO'nun yapılabildiği optimal güç akışı programı MATPOWER sonuçları ile doğrulanmıştır. (Bektaş ve ark., 2022), gerçek bir şebekede özellikle yaz aylarında olan yüksek gerilim problemi, otomatik sayaç okuma sistemi (OSOS) verileri ile doğrulanmıştır. Problemin AG taraftaki bir kullanıcı için çözülmesine dair alternatif yöntemler önerilmiştir. Gerçek bir şebekenin modellenmesi yapılmış ve AG taraftaki bir kullanıcıya güneş panelleri ve batarya depolama sistemi bağlanarak yüksek gerilimin 400 V seviyesine çekilmesi için algoritmalar geliştirilmiştir. Aynı zamanda, 34.5 kV / 0.4 kV'luk trafonun çıkışına SVR bağlanarak üreten-tüketicinin AG taraftan reaktif güç desteği vermesi ile hem hat kayıplarının azaltılması hem de gerilimin istenilen seviyelere çekilmesi sağlanmıştır. Sisteme AG tarafta SVR eklenmesi önerisinin diğer çözümlere göre daha ekonomik olduğu, AG hat kayıplarının ve mikro şebeke geriliminin istenilen düzeye çekilebildiği sonucu vurgulanmıştır.

Bu çalışmada, güneş panelleri ve batarya bulunan AG mikro şebeke için Kural Tabanlı ve Optimizasyon Tabanlı EYS geliştirilmiştir. Akıllı şebeke, IEEE 13 Bara test sistemine bağlanmıştır. Her iki EYS algoritmasının uygulandığı mikro şebekeye, 24 saatlik gerçek bir OSOS gerilimi ve talep güç uygulanarak gerilim probleminin SVR ile çözülmesine yönelik gerilim kontrol algoritması önerilmiştir. Kural tabanlı EYS algoritması, test sistemi ve SVR modeli Simulink/MATLAB ortamında geliştirilmiştir. Optimizasyon tabanlı EYS için Python GLPK çözücü, "solver", kütüphanesi kullanılmış. Bu makale ile AG seviyesinde SVR'ın simülasyon modeli ilk kez literatürde yer almaktadır. SVR gerilim kontrolü algoritması ile mikro şebekelerin maruz kalabileceği yüksek gerilim probleminin çözülebileceği ve Optimizasyon tabanlı EYS'nin birlikte kullanılması ile de mikro şebekenin Kural tabanlı EYS'ye göre daha verimli bir şekilde yönetilebileceği simülasyon sonuçları ile doğrulanmıştır.

Makale şu şekilde kurgulanmıştır; 2. Bölümde, IEEE 13 Bara test sistemi, test sistemine bağlanan akıllı şebeke yönetimi için geliştirilen algoritmalar ve detayları sunulmuştur. 3. Bölüm, benzetim çalışmalarına, algoritmaların uygulanması için uygulanan yöntemleri içermektedir. 4. Bölümde, benzetim çalışması sonuçları önerilen algoritmalar için verilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Son olarak, 5. Bölümde elde edilen sonuçlar özetlenmiştir.

2. Materyal ve Metot

IEEE 13 Bara Test sistemi, 4160 V orta gerilimde dağıtım hatları, 671. ve 692. Baralar arasında bir adet kesici, 633. ve 634. Baralar arasında 4160/400 V trafo, farklı baralara bağlı şönt kapasitörler ve endüktif reaktif yüklerden oluşmaktadır. Sistemdeki yükler yaklaşık olarak 5 MW aktif güç 3 MVAR reaktif güç çekmektedir, buda 0,86 geride güç katsayısı anlamına gelmektedir. IEEE 13 Bara Test sistemi, Şekil 1.'de verilmiştir. 634 nolu AG baraya, SVR bağlanmış ve SVR altında AG baraya ise güneş enerji panelleri, batarya ve yük bağlanmıştır.



Şekil 1. IEEE 13 bara test Sistemi ve mikro şebeke

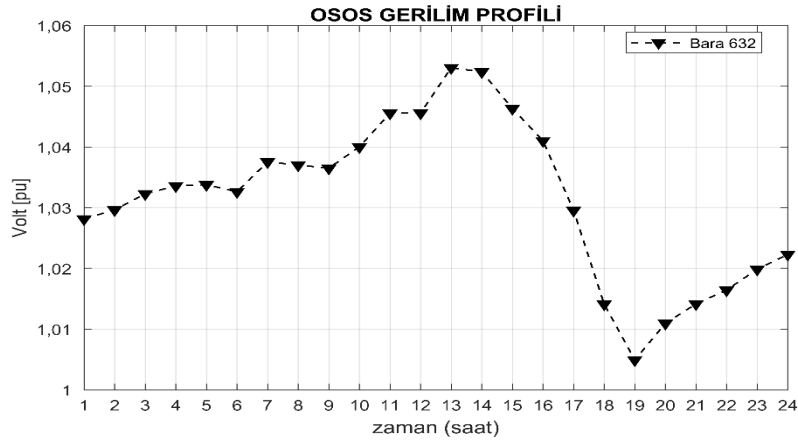
IEEE 13 bara test sistemine bağlı mikro şebekeye uygulanan 24 saatlik gerilim, tüketim ve güneş enerji üretim verileri Şekil 2.'de verilmiştir. Gerilim, tüketim ve güneş enerjisi üretim verileri Elazığ ili OSOS'dan alınmıştır. 632 nolu baraya OG gerilim verisi uygulanmış, mikro şebeke tüketim ve güneş panelleri üretim verileri için ise 34.5kV/0.4 kV'luk bir trafoya bağlı akıllı şebeke verileri kullanılmıştır [1].

IEEE 13 bara test sistemine bağlı mikro şebeke enerji yönetimi için Kural Tabanlı ve Optimizasyon Tabanlı EYS algoritmaları geliştirilmiştir. Bölüm 2.1 ve Bölüm 2.2'de geliştirilen EYS algoritmaları detayları sunulmaktadır. Bölüm 2.3'de ise SVR gerilim kontrol algoritması detayları verilmiştir.

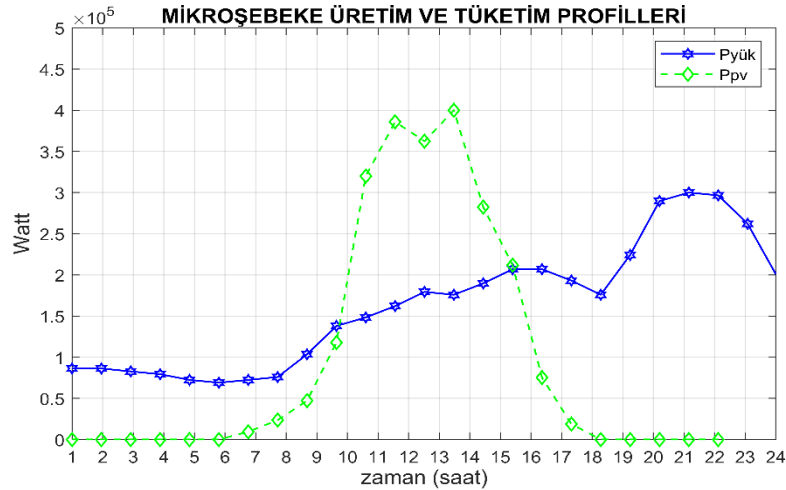
2.1 Kural Tabanlı Enerji Yönetimi Algoritması

Kural tabanlı enerji yönetim algoritması detayları Şekil 4.'te verilmiştir. Geliştirilen algoritma ortalama üretim ve tüketim gücüne göre net gücü hesaplamaktadır ve çalışması 2 madde ile özetlenebilir;

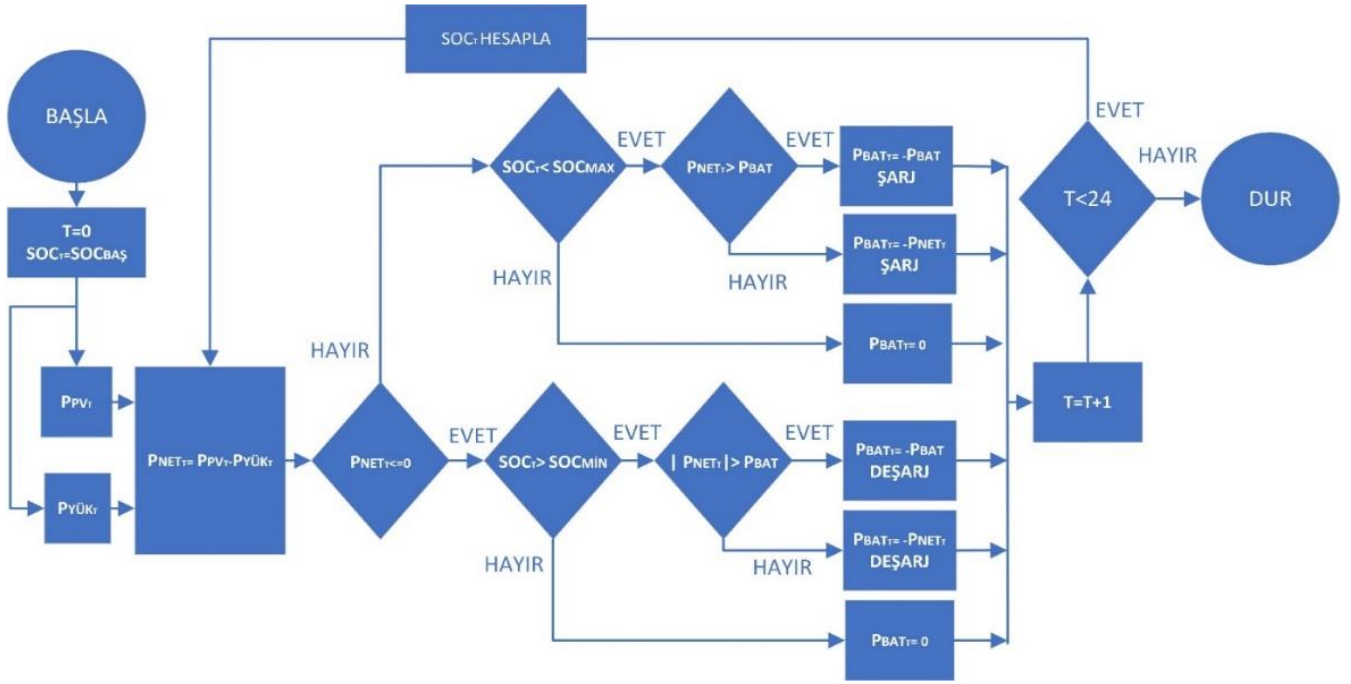
- Net güç 0'dan küçük ise, bir başka deyişle üretilen güç tüketilen güçten az ise, bataryanın belirli bir miktar deşarj edilmesi ile gerekli güç karşılanabilir ya da bunun yanında şebekeden güç çekilmesine de ihtiyaç duyulabilir. Ancak bu durum bataryanın Şarj Durumu (SOC)'nun minimum değerden büyük olması ile mümkün olabilir. Deşarj miktarı ise net gücün değerine göre değişiklik göstermektedir.
- Net gücün 0'dan büyük olduğu durum için ise, bataryanın şarj edilmesi bataryanın SOC'nun maksimum değerden küçük olması ile mümkündür. Eğer artan güç var ise bu durumda şebekeye güç verilecektir.



Şekil 2. OSOS gerilim verisi



Şekil 3. Mikro şebeke verileri



Şekil 4. Kural tabanlı enerji yönetimi algoritması

2.2. Optimizasyon Tabanlı Enerji Yönetimi

Mikro şebekenin optimum bir şekilde yönetilmesi, matematiksel modelinin çıkarılması ile mümkündür. Mikro şebeke matematiksel modeli KTSDP optimizasyon modeli şeklinde yazılabilir. Reel değişkenler ve ikili değişkenlerden oluşan KTSDP modeli genel olarak Denklem 1-3'de tanımlanmıştır;

$$\min_{x, z} f(x, z) = a^T x + b^T z \quad (1)$$

$$G(x, z) = c \text{ koşulu ile} \quad (2)$$

$$d \geq H(x, z) \text{ koşulu ile} \quad (3)$$

$f(x, z)$ amaç fonksiyonudur, c ve d ise skaler vektörlerdir. $G(x, z)$ ve $H(x, z)$, eşitlikler ve kısıtların lineer kombinasyonu olarak tanımlanır. Bu yolla, Mikro şebeke için belirtilen formülasyonlar optimizasyon problemi haline dönüştürülmüştür. $H(x, z)$ tanımlanan kısıtları, $C(x, z)$ ise güç dengesi eşitliliğini temsil etmektedir. Optimizasyon Tabanlı EYS için tanımlanan parametreler Tablo 1.'de, Batarya ile ilgili parametreler ise Tablo 2'de verilmiştir.

GLPK (GNU Linear Programming Kit) kütüphanesi başlıca, büyük ölçekli doğrusal programlama, "large scale linear programming", KTSP modelleri ve diğer optimizasyon modellerinin çözümü için tasarlanmıştır ve Python programlama dili ile kullanılabilir. ANSİ C ile yazılmış ve çağrılabilir bir kütüphane şeklinde düzenlenmiş bir dizi rutindir (URL-1). Mikro

şebeke optimizasyonuna ait formülasyon GLPK çözücü kütüphanesi kullanılarak Python programlama diline uyarlanmıştır. Bu şekilde optimum çözüm elde edilebilir. Ayrıntılı sonuçlar, Bölüm 4.'te analiz edilecek ve açıklanacaktır.

Tablo 1. Enerji yönetim sistemi parametreleri

Parametreler	Tanımlar	Birim/Değer
P_t^{PV}	Günlük Güneş enerjisi gücü	[kW]
$P_t^{GRID,in}$	Şebekeden alınan güç	[kW]
$p_t^{GRID,in}$	Şebekeden alınan güç fiyatı	0.82 TL/kWh
$P_t^{GRID,ex}$	Şebekeye verilen güç	[kW]
$p_t^{GRID,ex}$	Şebekeye verilen güç fiyatı	0.47 TL/kWh
P_t^{Load}	Yük talep gücü	[kW]

Tablo 2. Batarya parametreleri

Parametreler	Tanımlar	Birim/Değer
$P_t^{BAT,chg}$	Batarya şarj gücü	[kW]
$P_t^{BAT,dcg}$	Bataryadeşarj gücü	[kW]
$p_{chg,max}$	Batarya şarj limiti	[kW] 30
$p_{dcg,max}$	Bataryadeşarj limiti	[kW] 30
R_{up}^{BAT}	Batarya ramp up limiti	[kW/h] 30
R_{down}^{BAT}	Batarya ramp down limiti	[kW/h] 20
η_{chg}^{BAT}	Batarya şarj verim katsayısı	[p.u.] 0.98
η_{dcg}^{BAT}	Bataryadeşarj verim katsayısı	[p.u.] 0.98
SOC_t^{BAT}	Batarya başlangıç şarj durumu	[kWh] %90
SOC_{max}^{BAT}	Batarya şarj durumu maksimum değeri	[kWh] %90
SOC_{min}^{BAT}	Batarya şarj durumu minimum değeri	[kWh] %20
$SOC_n^{BAT,max}$	Bir sonraki adımdaki batarya şarj durumu maksimum değeri	[p.u.]
$SOC_n^{BAT,min}$	Bir önceki adımdaki batarya şarj durumu minimum değeri	[p.u.]

2.2.1 Amaç fonksiyonu

Mikro şebekenin kendi üretimini maksimum şekilde kullanması amaçlayan amaç fonksiyonu, aynı zamanda sistem faturasını Δt zaman aralığında minimize etmektedir ve Denklem 4'de tanımlanmıştır;

$$\min F = \sum_{t=1}^T (p_t^{GRID,ex} \cdot P_t^{GRID,ex} - p_t^{GRID,in} \cdot P_t^{GRID,in}) \Delta t \quad (4)$$

2.2.2 Kısıtlar

Güç dengesi ile ilgili kısıt şu şekilde tanımlanmıştır;

$$P_t^{PV} + P_t^{BAT,dcg} + P_t^{GRID,in} - P_t^{GRID,ex} - P_t^{BAT,chg} - P_t^{Load} = 0 \quad (5)$$

Güç dengesi için her T periyodu için optimizasyon programında ek olarak aşağıdaki kural tanımlanmalıdır;

$$P_t^{GRID,in} > 0 \text{ ise } P_t^{GRID,ex} = 0 \quad (6)$$

$$P_t^{GRID,in} > 0 \text{ ise } P_t^{GRID,in} = 0 \quad (7)$$

Batarya için birden çok kısıt tanımlanmalıdır. Bu kısıtlardan ilki batarya ‘ramp’ oranı limitidir ve şu şekilde verilmiştir;

$$P_{t-1}^{BAT,chg} + P_t^{BAT,dcg} \leq R_{down}^{BAT} \dots \forall t, t - 1 \in T \quad (8)$$

$$P_{t-1}^{BAT,dcg} + P_t^{BAT,chg} \leq R_{up}^{BAT} \dots \forall t, t - 1 \in T \quad (9)$$

Her t periyodu için, bataryanın sadece şarj ya da sadece deşarj olacağı bilindiği için optimizasyon programında ek olarak aşağıdaki kurallar tanımlanmalıdır;

$$P_t^{BAT,chg} > 0 \text{ ise } P_t^{BAT,dcg} = 0 \quad (10)$$

$$P_t^{BAT,dcg} > 0 \text{ ise } P_t^{BAT,chg} = 0 \quad (11)$$

İkinci kısıt ise SOC ile alakalıdır. Bu kısıt bataryanın şarj ve deşarj olma kapasitelerinin aşılması için gereklidir. Bataryanın maksimum ve minimum enerjisi olarak ta tanımlanabilen SOC değeri kısıtı Denklem 12.’de verilmiştir. Tablo 2’de de tanımlandığı üzere minimum ve maksimum SOC değeri %20 ve %90 olarak tanımlanmıştır. 85 kWh’lik batarya için minimum ve maksimum SOC değerleri sırasıyla 17 kWh ve 76.5 kWh ’tır.

$$SOC^{BAT,min} \leq SOC_t^{BAT} \leq SOC^{BAT,max} \dots \forall t \in T \quad (12)$$

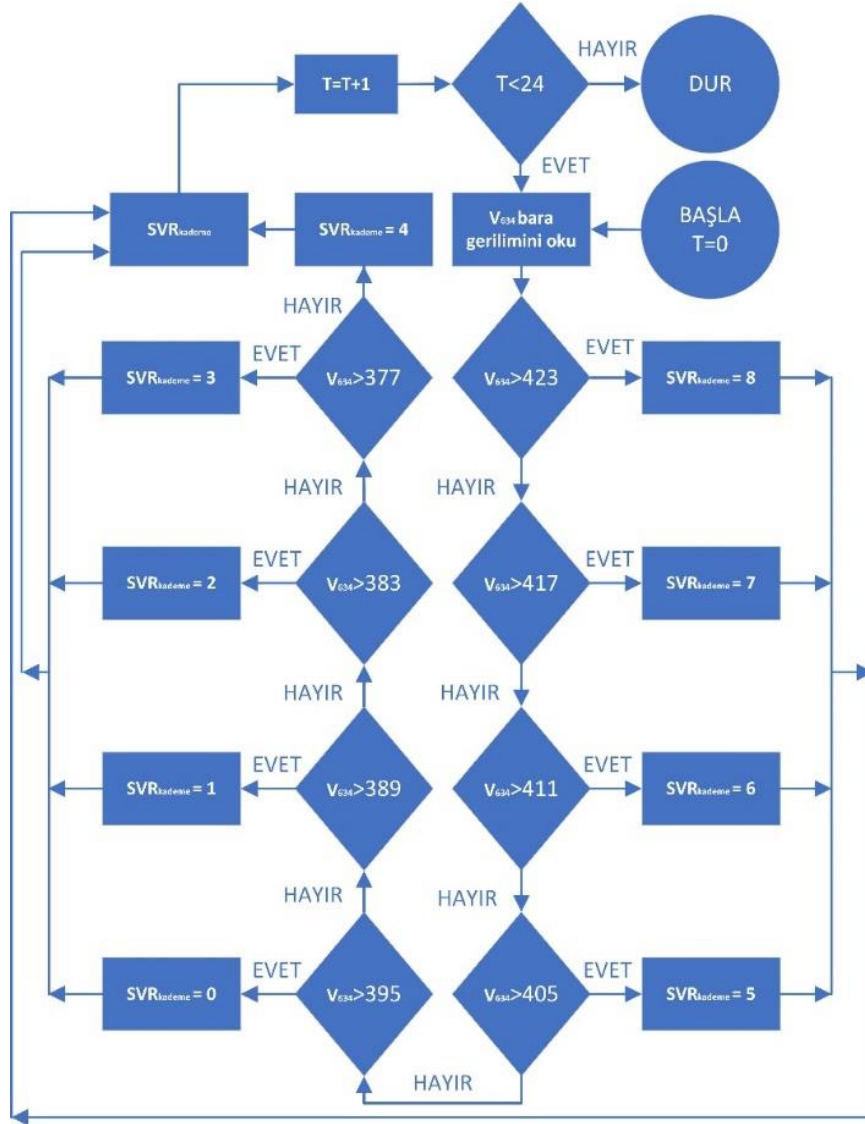
2.3 SVR Gerilim Kontrolü Algoritması

SVR, 4.16 kV / 0.4 kV’luk trafo çıkışı olan 634 nolu baraya bağlanmıştır ve gerilim kontrol algoritması ile kontrol edilmektedir. SVR kademelerine göre giriş ve çıkış gerilimi değişimlerini gösteren anahtarlama detayları Tablo 3.’te verilmiştir. Yazılan algoritma SVR giriş gerilimine göre kademeyi belirlemekte ve çıkış gerilimini 395-405 V arasında tutmaktadır.

SVR için geliştirilen gerilim kontrol algoritması Şekil 5.’te verilmektedir. Geliştirilen algoritma ile giriş gerilimi her saat aralığı için okunmaktadır ve gerilimin 395 V - 405 V arasında tutulması için gerekli kademe belirlenmektedir. Ardışık SVR kademeleri arasında 6V’luk gerilim farkı vardır. SVR düşürme moduna, girişine yüksek gerilim geldiğinde geçer ve maksimum düşürme oranının 1,06 ile 4.kademede olduğu düşünülürse yaklaşık 423 V’luk gerilimi 400 V seviyelerine indirebilir. Benzer şekilde SVR yükseltme moduna, girişine düşük gerilim geldiğinde geçer ve minimum düşürme oranının 0,94 olması nedeniyle ile yaklaşık 377 V alt sınır değerini 400 V’a çekebilir. Diğer ara kademelere ait sınır değerler ise çıkış gerilimin 400 V’a yaklaştırılması amaçlanarak tanımlanmıştır.

Tablo 3. SVR anahtarlama

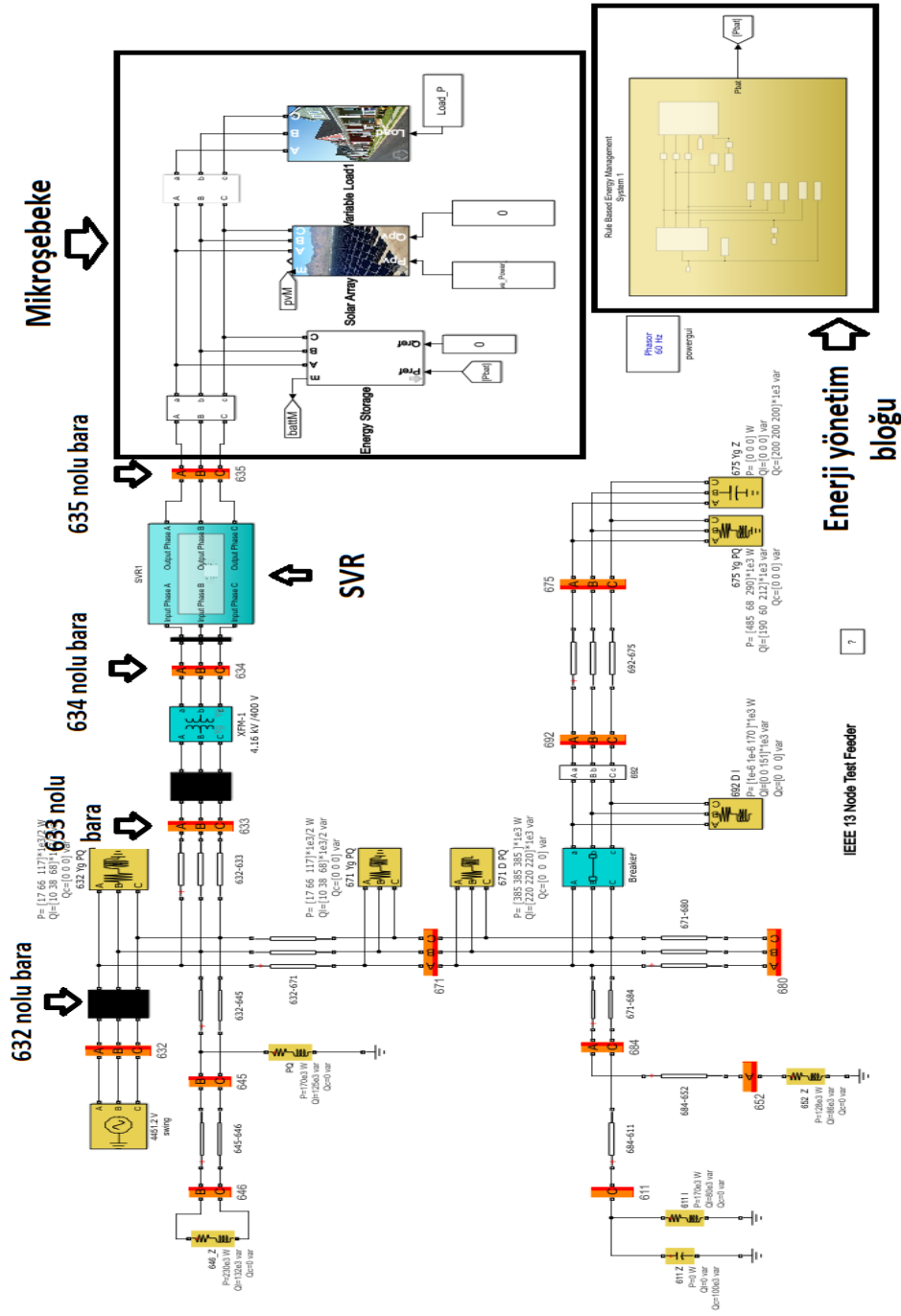
Kademe	V_{in} (pu)	V_{out} (pu)	%	Anahtarlar (açık)	Anahtarlar (kapalı)
0	1	1	+0	1,3	2,4,5,6,7
1	1	1,015	101,5	4,5	1,2,3,6,7
2	1	1,03	103	2,3	1,4,5,6,7
3	1	1,045	104,5	2,6	1,3,4,5,7
4	1	1,06	106	2,4	1,3,5,6,7
5	1	0,985	98,5	3,5	1,2,4,6,7
6	1	0,97	97	1,4	2,3,5,6,7
7	1	0,955	95,5	1,6	2,3,4,5,7
8	1	0,94	94	1,3	2,4,5,6,7



Şekil 5. SVR gerilim kontrol algoritması

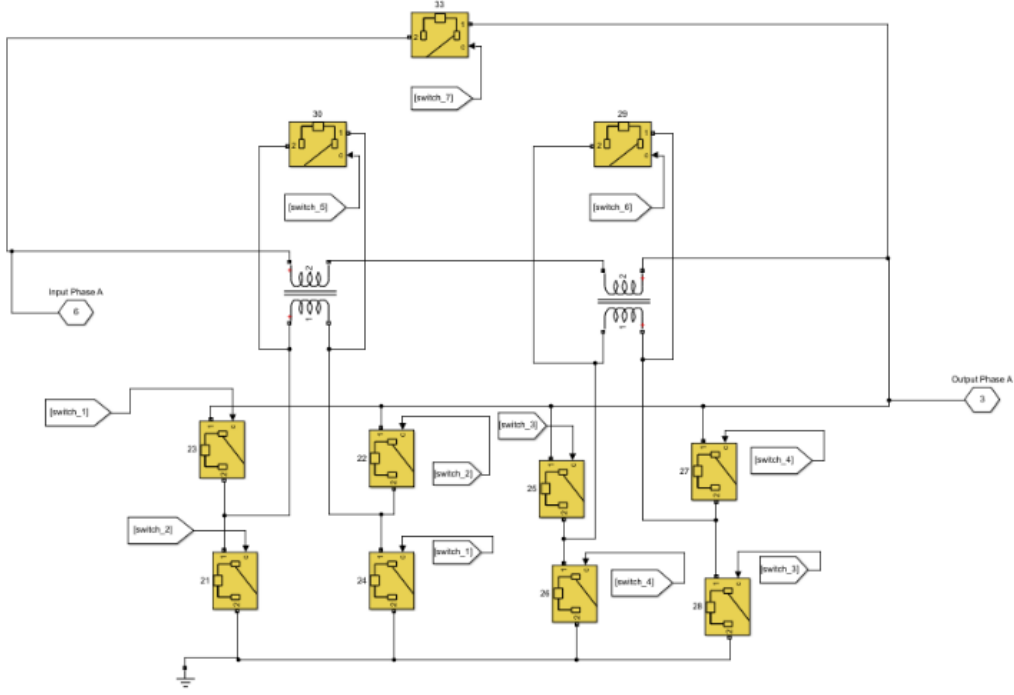
3. Mikro Şebeke Modeli ve Benzetim Çalışmaları

Bölüm 2.'de detaylı bir şekilde anlatılan Kural Tabanlı ve Optimizasyon Tabanlı EYS'ler için oluşturulan simülasyon modeli Şekil 6.'da verilmiştir.

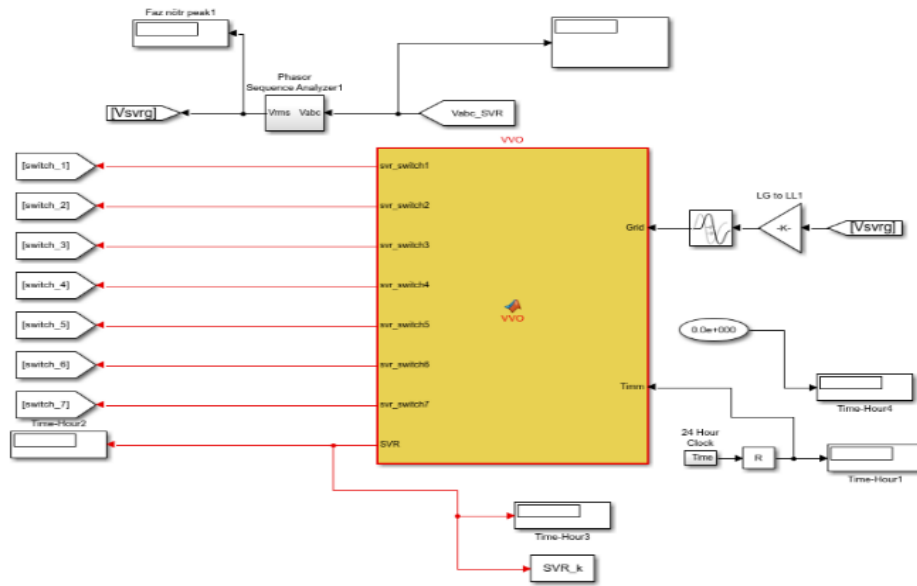


Şekil 6. IEEE 13 bara test sistemi simülasyon şeması

24 saatlik üretim ve yük talebi için MATLAB/Workspace'den tanımlanan profiller “from workspace” bloğu ile Simulink'e aktarılmaktadır. Sistemde bulunan simülasyon parametreleri, “phasor” modda simülasyonun kaç saniye çalıştırıldığına bağlı olmaksızın 24 saatlik sonuç verecek şekilde yazılan MATLAB kodu ile tanımlanmaktadır. Simülasyonda bulunan batarya ve güneş enerji modelleri AC baraya bağlanmak için kendi içinde invertörleri barındırmaktadır.



a)



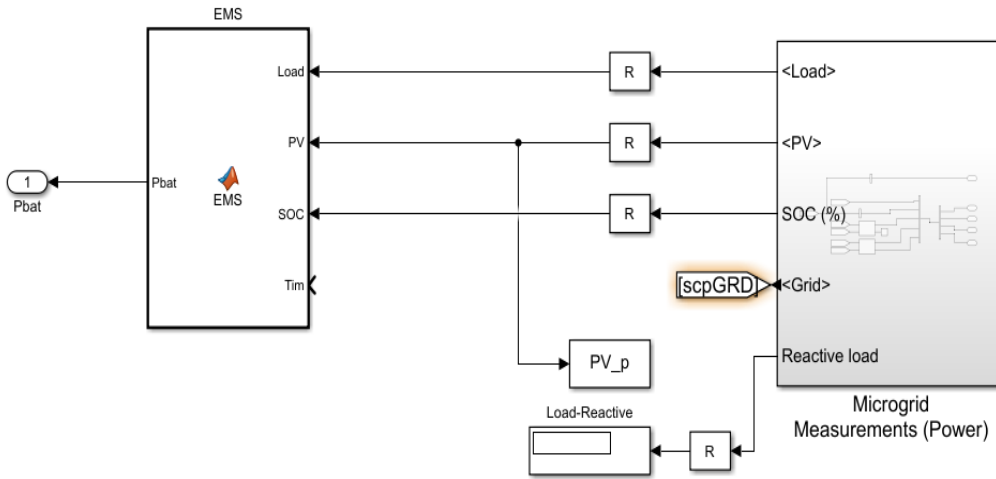
b)

Şekil 7. Statik voltaj regülatörü: a) MATLAB/Simulink modeli, b) Gerilim kontrolü fonksiyon bloğu

Mikro şebeke modeli içerisinde bulunan batarya 85 kWh kapasiteli 50 kW olarak seçilmiştir. Alt ve üst şarj limitleri %90 ve %20, başlangıç enerjisi ise üst şarj limiti olan 76.5 kWh olarak tanımlanmıştır. SVR ve gerilim kontrol bloğu MATLAB/Simulink modeli, Şekil 7’de verilmiştir. Statik Gerilim Regülatörü, giriş gerilimi %1,5 ve %4,5’e düşürmekte ve bu gerilimleri anahtarlama prensibine bağlı olarak giriş gerilimine seri, aynı ya da ters polariteli şekilde bağlayarak çıkışa vermektedir. Böylece çıkışta, giriş geriliminin %94, %95,5, %97, %98,5, %100, %101,5, %103, %104,5 ve %106’sını regüle edebilmektedir.

3.1 Kural Tabanlı Enerji Yönetimi

Mikro şebeke, Bölüm 2.1’de anlatılan Kural Tabanlı EYS algoritmasına göre yazılan MATLAB fonksiyonu ile kontrol edilmektedir. Bu algoritma, mikro şebekede talep yükten fazla bir üretim olduğunda bataryayı şarj etmekte, artan güç varsa şebekeye vermektedir. Talep yükten az üretim durumunda ise bataryayı deşarj etmekte ve batarya gücü yetmediği zamanlarda ise şebekeden güç almaktadır. Yönetim bloğu Şekil 8.’de verilmiştir.



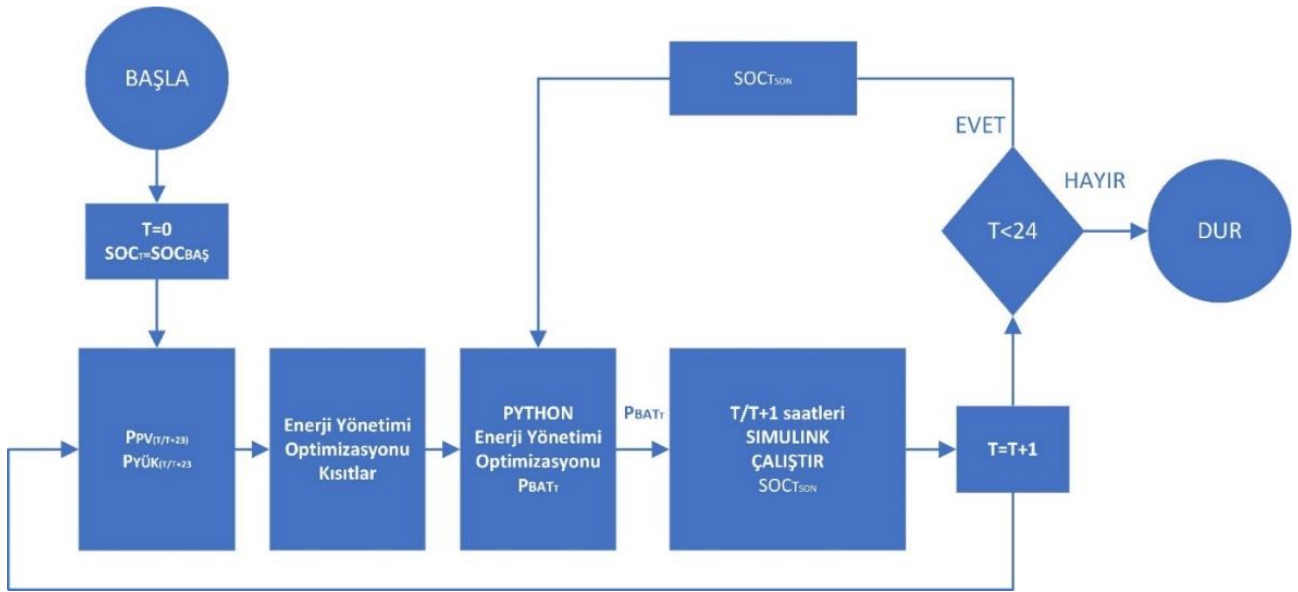
Şekil 8. Kural tabanlı enerji yönetimi bloğu

3.2 Optimizasyon Tabanlı Enerji Yönetimi

Bölüm 2.2’de anlatılan Optimizasyon Tabanlı EYS’nin, optimizasyon kısmı Python’da yapılmıştır. Python’dan alınan sonuçlara göre de Simulink’te aktif güç akışının izlenebilmesi adına

simülasyon çalıştırılmaktadır. Bu iki programın sıralı bir şekilde çalıştırılması gerekmektedir. Python/Simulink entegrasyonu için geliştirilen algoritma Şekil 9.'da verilmiştir ve çalışması 5 madde ile özetlenebilir;

- İlk olarak Python programı, MATLAB fonksiyonu ile çalıştırılmaktadır.
- İlk saat için sonuç dosyasını oluşturduktan sonra, elde edilen sonuç dosyasına göre Simulink çalıştırılmaktadır.
- Simulink, Python programı tarafından elde edilen sonuç dosyalarını her saat başında okuyarak, simülasyonu gerçekleştirmektedir. Python programı da diğer saatler için bir önceki saatin sonundaki SOC değerini Simulinkten alarak çözüm yapmaktadır.
- Python çalışırken Simulink, Simulink çalışırken de Python programı durdurulmakta ve bir sonraki optimizasyon ya da simülasyon için gerekli parametreler diğer program tarafından sağlanmakta ve ortak dosyadan okunmaktadır.
- Bu şekilde kurulan ardışık çalışma döngüsü ile 24 saatlik optimizasyon algoritması akıllı şebeke için uygulanmış olunur.



Şekil 9. Python/Simulink entegrasyonu akış diyagramı

4. Bulgular ve Tartışma

Mikro şebeke, Bölüm 2.1 ve 2.2’de anlatılan Kural ve Optimizasyon Tabanlı EYS ile simüle edilmiş ve bağlı olduğu IEEE 13 test sistemindeki aktif güç akışı gözlemlenmiştir. Aynı zamanda, 632 nolu baraya 24 saat boyunca değişkenlik gösteren gerçek OSOS gerilim verisi uygulanmış ve

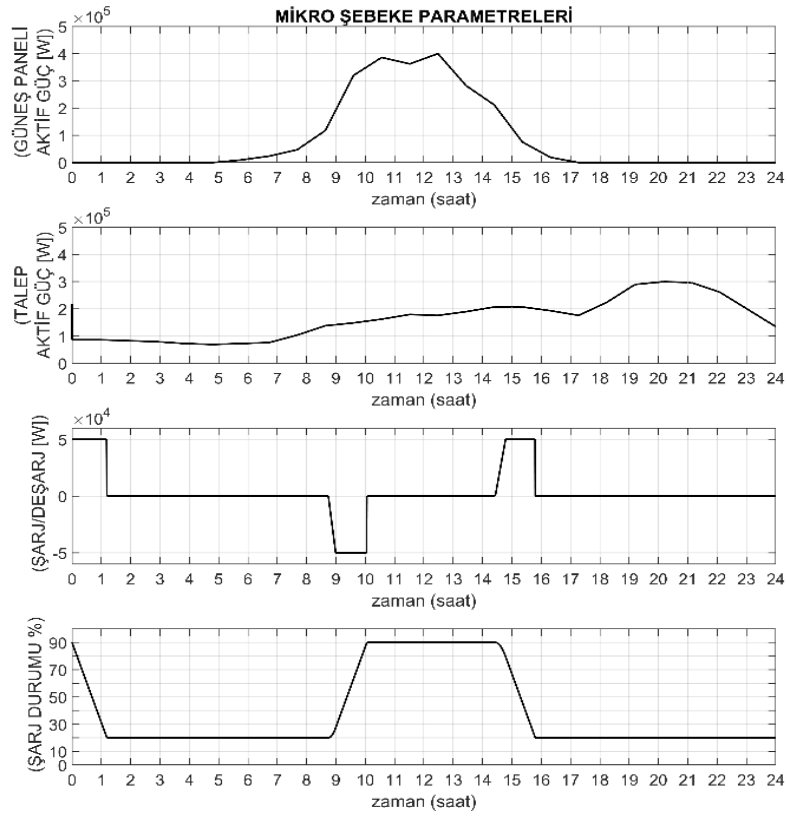
mikro şebeke üzerindeki gerilim gözlemlenmiştir. Ülkemizin güneşli gün sayısı ve gün boyunca güneşlenme saat aralığının fazla olması neticesinde, özellikle OG seviyesinde güneş enerji üretimi ile talep güç eğrisine de bağlı olarak gündüz saatlerinde gerilim artmakta, akşam ve gece saatlerinde ise gerilim düşmektedir. Bu nedenle, AG taraftaki güç kalitesinin artırılması amaçlanmış ve mikro şebeke gerilimi SVR ile 0,95 pu ve 1,05 pu arasında tutulmaya çalışılmıştır.

Şekil 10. a ve b' de her iki EYS için mikro şebekenin çalışma detayları sunulmuştur. Şekillerdeki en üst satır, mikro şebeke güneş panellerinden üretilen aktif gücü temsil etmektedir. Bir alt satırda, mikro şebeke yüklenme profili verilmiştir. Görüldüğü üzere tüketimin daha çok olduğu akşam ve gece saatlerinde, güneş enerjisi üretiminin olmaması özellikle kendi enerji ihtiyacını karşılamak amaçlı kurulan mikro şebekeler için gündüz üretilen enerjinin depolanma ihtiyacını beraberinde getirmektedir. Şekil 11.'de gücün mikro şebeke tarafından şebekeye doğru akması sonucu mikro şebekenin çektiği güç eksi tarafa geçmektedir. Buda gücün ters tarafa aktığı anlamına gelmektedir.

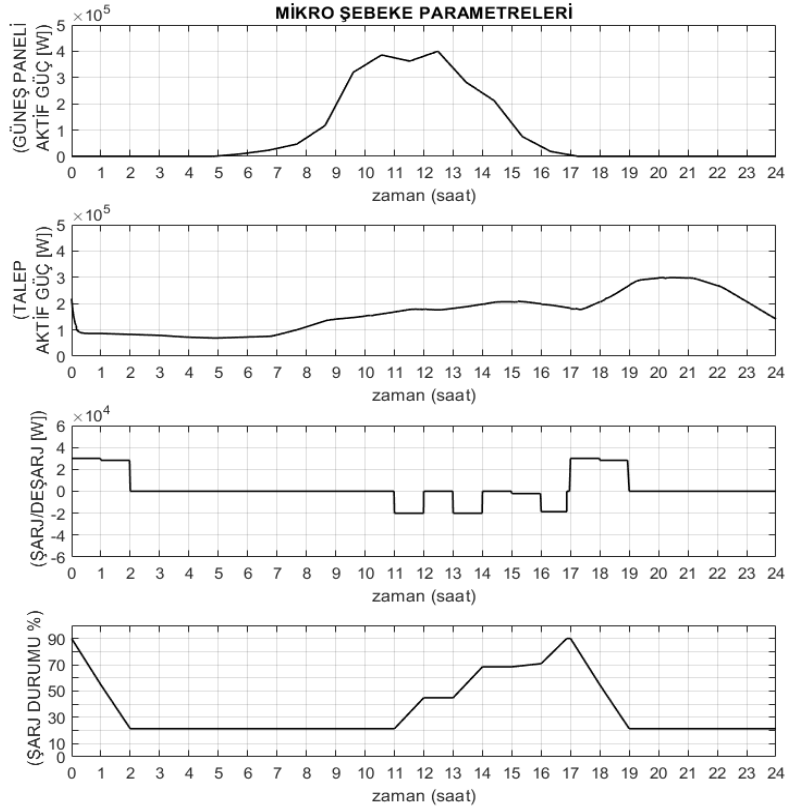
Kural tabanlı algoritma için, enerji üretimi olmayan gece 00:00 ve 01:00 saatleri arasında talep gücü karşılamak amaçlı ilk başta bataryanın 50kW'lık deşarj gücü kullanılmış, ancak bu güç yeterli olmadığı için şebekeden de güç çekilmiştir. Optimizasyon tabanlı enerji yönetiminde ise söz konusu saatlerde batarya 30 kW'lık güç ile deşarj edilmiştir. Bunun nedeni algoritmanın batarya 'ramp up' limitini aşmamasıdır. Aynı zamanda öğle saatleri incelendiği zaman batarya 11:00-12:00, 13:00-14:00 ve 16:00-17:00 saatleri arasında şarj olduğu gözlemlenmektedir. Burada da 20 kW olarak tanımlanan batarya 'ramp down' limiti devreye girmektedir. Her iki algoritma içinde SOC değeri gün sonunda % 20 lik değere denk gelen 17 kWh'tır. Kural bazlı algoritmanın çalışması batarya da enerji olma durumunda ilk olarak kullanılması ya da talep gücün karşılanması sonucunda bataryanın depolanması kurallarına dayandığı için SOC değerinin minimumda kalması beklenen bir durum olarak karşımıza çıkmaktadır. Ancak Bataryanın ani olarak şarj ya da deşarj olması ömrünü olumsuz bir şekilde etkilemektedir.

Optimizasyon tabanlı EYS için ise seçilen amaç fonksiyonunun şebekeye maksimum güç verilmesi olarak tanımlanması sebebiyle 24 saatlik periyot sonunda bataryanın enerjisi minimum seviyededir. Ancak günümüzde, gün boyunca enerji alımının ve satışının farklı fiyatlarda olacağı gerçeği düşünüldüğünde bir mikro şebekenin enerji yönetimi ile kontrol edilmesi, bataryanın şarj edileceği ve deşarj edileceği zamanlara daha esnek bir şekilde karar verilmesi, sistemin ürettiği enerjinin daha yüksek fiyatlara satılması anlamına geleceği için oldukça önem arz etmektedir.

Mikro Şebekeler için Enerji Yönetimi ve Gerilim Kontrol Algoritmalarının Geliştirilmesi: Alçak Gerilim Seviyesinde Statik Voltaj Regülatörü Örneği

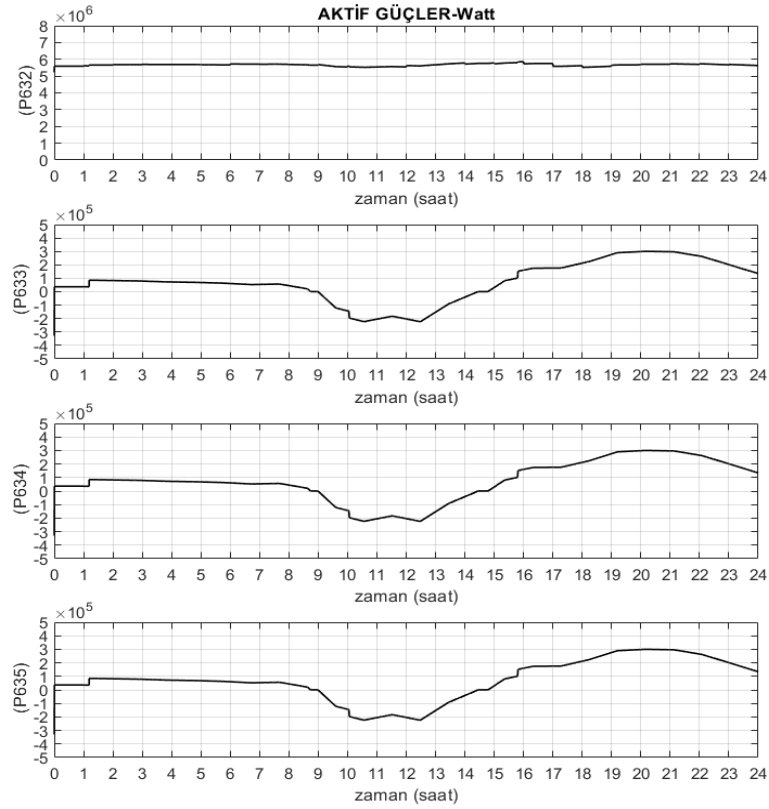


a)

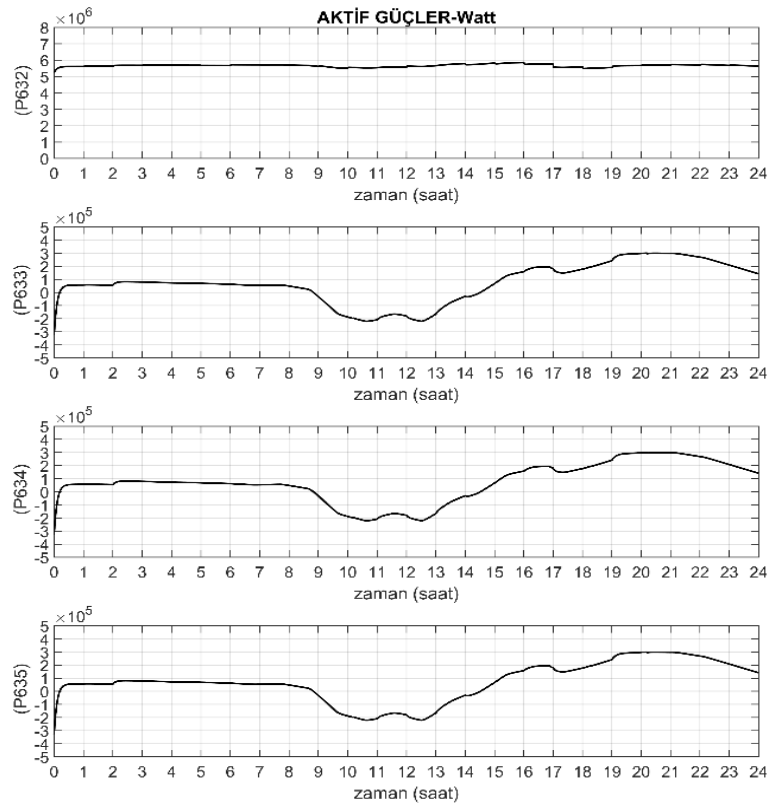


b)

Şekil 10. Mikro şebeke parametreleri: a) Kural Tabanlı EYS, b) Optimizasyon Tabanlı EYS



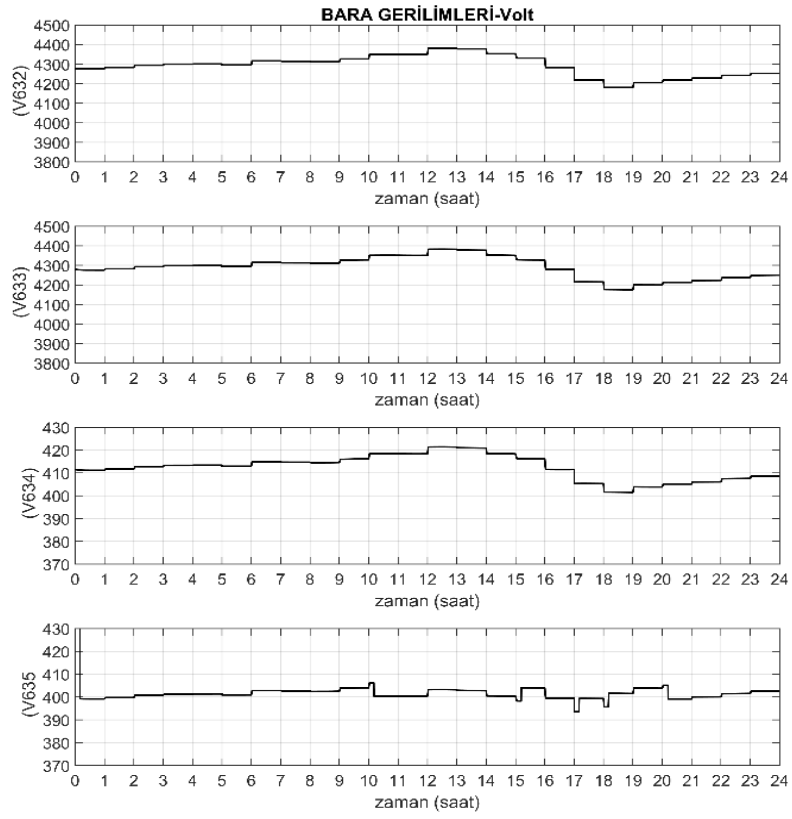
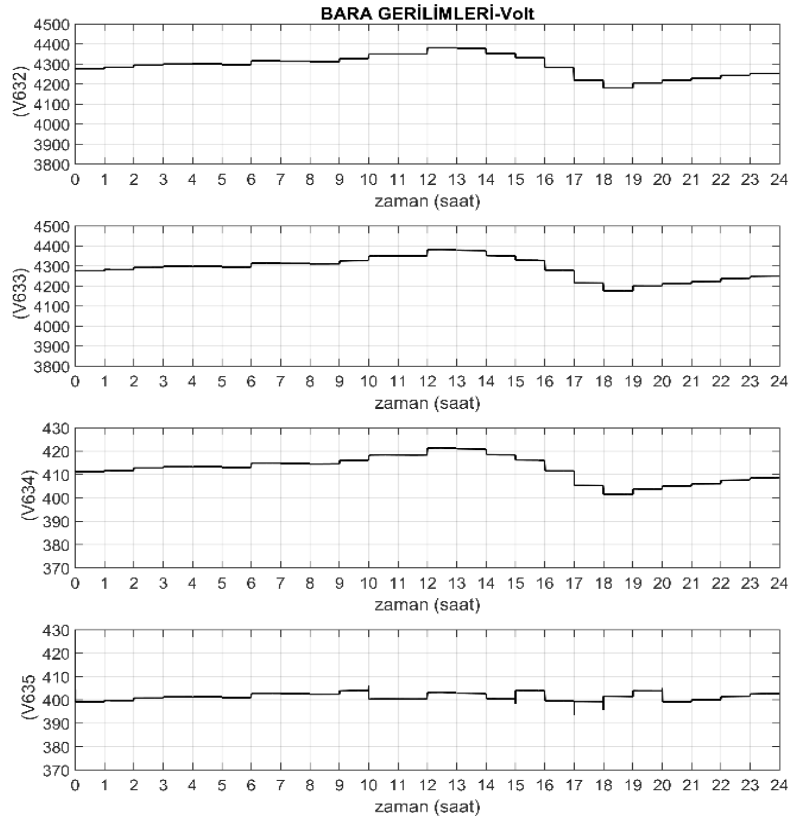
a)



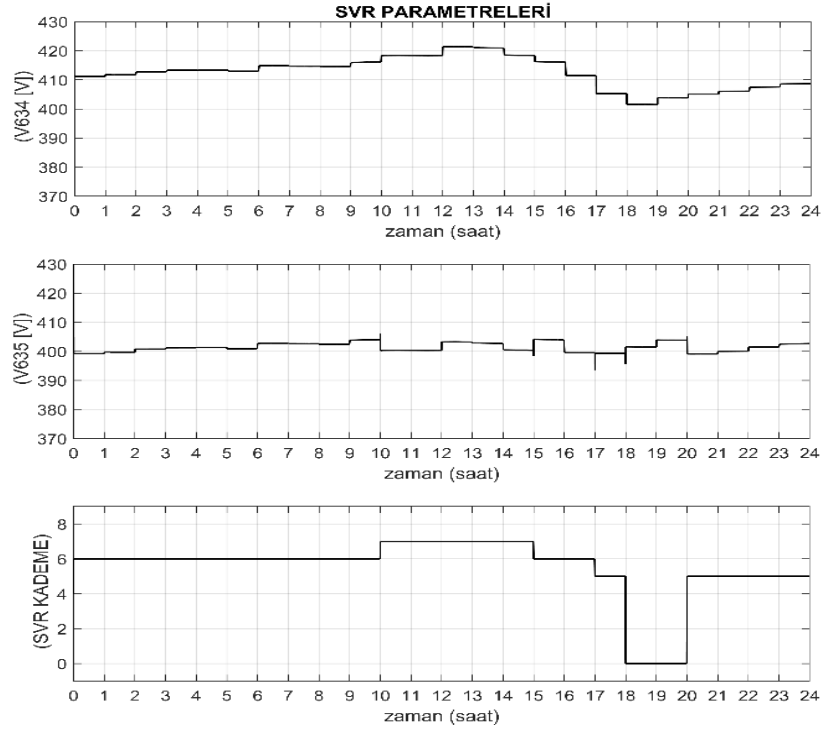
b)

Şekil 11. Baralardan çekilen aktif güçler: a) Kural Tabanlı EYS, b) Optimizasyon Tabanlı EYS

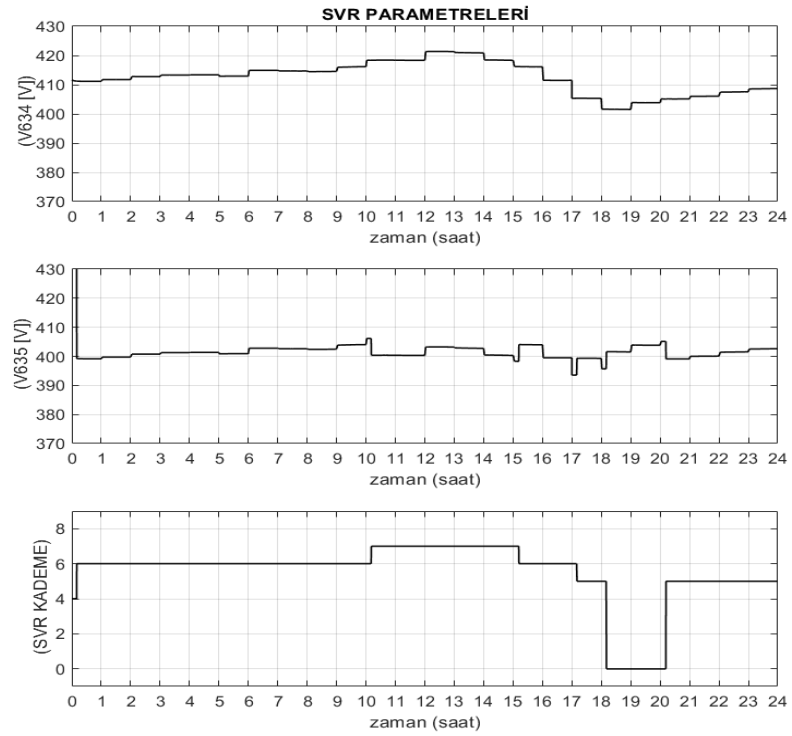
Mikro Şebekeler için Enerji Yönetimi ve Gerilim Kontrol Algoritmalarının Geliştirilmesi: Alçak Gerilim Seviyesinde Statik Voltaj Regülatörü Örneği



Şekil 12. Bara gerilimleri: a) Kural Tabanlı EYS, b) Optimizasyon Tabanlı EYS



a)



b)

Şekil 13. SVR parametreleri: a) Kural Tabanlı EYS, b) Optimizasyon Tabanlı EYS

Şekil 12.'de bara gerilimleri verilmiştir. 632 nolu bara altındaki diğer baralardaki gerilimler incelenmiştir. OSOS verilerine göre OG seviyede gerilim 4175 V – 4375 V arasında gün boyunca değişmektedir. Bunun nedeni daha öncede belirtildiği üzere dağıtık üretimin varlığı ve tüketim profilinin akşam saatlerinde, 18:00 ve 22:00 saatleri arası, daha fazla olmasıdır. Bu nedenle gündüz saatlerinde gerilim maksimum seviyeye ulaşmaktadır.

Şekil 13.'te SVR giriş ve çıkış gerilimi verilmiştir. Şekil 12.'de verilen OG'deki gerilim yükselmesinin etkisi AG tarafta da gözlemlenmektedir. SVR gerilim kontrol algoritması ile her iki EYS algoritmasının uygulandığı sonuç içinde gerilim istenilen seviye çekilmiştir. Özellikle, batarya şarj deşarj zamanlarının ve miktarlarını farklı olması nedeniyle SVR çıkışını temsil eden 635 nolu bara geriliminde küçük farklılıklar ve 400 V'un altında ya da üstünde küçük dalgalanmalar gözlemlenmektedir. Her iki durum içinde, mikro şebeke tarafındaki gerilimin düzeltilmesi SVR ile bu kadar mümkündür. 6V'un altındaki dalgalanmaların yok edilmesi için akıllı şebekenin reaktif güç dengesinin de sağlanması gerekmektedir. Bunun için mikro şebekelerde bulunan güneş panelleri ya da batarya invertörlerinin sisteme reaktif güç desteği sağlaması gerekmektedir. Gerilimin 400V'tan yüksek olduğu, sapma değerinin SVR kademesi ile ayarlanamayacak kadar düşük olduğu zamanlarda, gerilimin 400 V'a sabitlenmesi için güneş panelleri invertörü ya da batarya invertörü kapasitif reaktif güç modunda şebeke desteklemelidir. Gerilimin 400V'tan düşük olduğu durumlarda ise güneş panelleri invertörü ya da batarya invertörü endüktif reaktif güç modunda şebekeyi desteklemelidir. Ancak, uygulamalarda ek donanım gerektiren bu yöntem ve sistem maliyetini arttıracaktır. OSOS verisinde gerilimin 1pu ve üstü olması neticesinde, gerilim kontrol algoritması SVR'ı düşürme modunda yani 5., 6., 7. ve 8. kademelerde anahtarlamıştır. Böylelikle gerilim 24 saat boyunca 400 V seviyelerinde tutulmuştur.

5. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada, güneş enerjisi panelleri ve bataryaya sahip bir mikro şebeke için Kural tabanlı ve Optimizasyon Tabanlı Enerji Yönetimi algoritmaları geliştirilmiştir. IEEE 13 Bara test sisteminde bulunan 0.4 kV çıkışlı trafoya mikro şebeke bağlanmıştır. Günümüzde, dağıtık üretimin artması sonucunda günlük değişen gerilim profili için, gerçek saha OSOS verisi kullanılmış ve test sistemine bu gerilim verisi uygulanmıştır. Özellikle ülkemizde OG seviyesinde yük altında kademe değiştirici olmaması ve kademelerin mevsimlik ayarlanması sonucunda, gerilim yükselmelerinin kullanıcı tarafında olumsuz etkiler yaratması probleminin çözümüne yönelik AG tarafta SVR mikro

şebeke önüne bağlanmıştır. Mikro şebeke geriliminin 395 V-405 V arasında tutulması amaçlanmış ve SVR ile mümkün olacağı benzetim sonuçları ile doğrulanmıştır. Mikro şebekenin Optimizasyon Tabanlı EYS ile kontrol edilmesinin özellikle batarya ömrü ve ekonomik getiri bakımından daha tercih edilebilir olduğu sonucuna varılmıştır. Aktif gücün kontrolünün yanında geriliminde kontrol edilmesi gerektiği sonuçları üzerinde durulmuştur. SVR ile kullanıcı için kabul edilebilir bir aralıklarda gerilim ayarlanabildiği için, gerilimin tam olarak 400 V'a çekilmesi sadece gerilim regülatörü ile mümkün olmamaktadır. Bunun için reaktif güç desteği sağlayan invertörler sisteme dahil edilmelidir.

Yazarların Katkısı

Prof. Dr. Kamil Çağatay Bayındır danışmanlığında Doktora öğrencisi Enes Bektaş bu makaleyi yazmıştır. Diğer yazarlar makaledeki algoritmaları teknik açıdan incelemişlerdir, makaledeki algoritmaların geliştirilme ve OSOS verilerinin tedarik edilme aşamasında makaleye katkı sağlamışlardır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada, araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Teşekkür

Bu çalışma, İnavitas tarafından 'Dağıtık Üretim Tesislerinin Yaygın Şebeke Entegrasyonu için Volt/Var Talep Yönetim Sistemi Gerçekleştirilmesi' adlı proje kapsamında desteklenmiştir.

Kaynaklar

Akter, M. N., Mahmud, Md A., Than Oo, A. M., (2017). A hierarchical transactive energy management system for energy sharing in residential microgrids. *Energies*, Cilt 10, Syf. 2098-2124.

<https://doi.org/10.3390/en10122098>

Aryazanezhad, M., (2018). Management and coordinating of LTC, SVR, shunt capacitor and energy storage with high PV penetration in power distribution system for voltage regulation and power loss minimization, *Electric Power System Research*, Cilt 100, Syf.178-192.

<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2018.02.015>

- Bektaş, E., Bayındır, K.Ç., Terciyanlı, A., Aydın, R. A., Baykal, Ş., Yılmaz, H., (2022). Energy management integrated volt var optimization for distribution systems with SVR, PV inverter, and BESS: a case study in distribution system of Elazığ/Turkey. *Electrical Engineering* . <https://doi.org/10.1007/s00202-022-01690-6>
- Castro, M. V., Moreira C, Carvalho L. M., (2020). Hierarchical optimization for energy scheduling and volt-var control in autonomous clusters of microgrids. *IET Renewable Power Generation* Cilt 4, Sayı 1, Syf. 27–38. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2019.0357>
- Hu, J., Liu, Y., Yan, Z., (2017). Modelling on electrical power market clearing with consideration of the participation of VPP and MG in view of energy market internet, in *First IEEE Conference on Energy Internet*, Syf. 171-175, Beijing, China. [10.1109/ICEI.2017.37](https://doi.org/10.1109/ICEI.2017.37)
- Hu, J., Shan, Y, Xu, Y., Guerrero, J. M., (2019). A coordinated control of hybrid ac/dc microgrids with PV-wind-battery under variable generation and load conditions. *Electrical Power and Energy Systems*, Cilt 104, Syf. 583-592. [10.1016/j.ijepes.2018.07.037](https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2018.07.037)
- Ibrahim, M., Salama, M. M. A., (2015). Smart distribution system volt/var control using distributed intelligence and wireless communication. *IET Generation, Transmission & Distribution*, Cilt. 9, Syf. 307-318. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2014.0513>
- Jafari, M., Olowu, T. O., Sarwat, A. I., (2018). Optimal smart inverters Volt-Var selection with a multi-objective Volt-Var optimization using evolutionary algorithm approach, *50th North American Power Symposium (NAPS)*, Syf. 1-6, North Dakota. [10.1109/NAPS.2018.8600542](https://doi.org/10.1109/NAPS.2018.8600542)
- Long, Q., Wang, J., Lubkeman, D., Lu, N., Chen, P., (2019). Volt-Var optimization of distribution systems for coordinating utility voltage control with smart inverters, *IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT)*, Syf. 1-5, Washington, DC. [10.1109/ISGT.2019.8791600](https://doi.org/10.1109/ISGT.2019.8791600)
- Luna, A. C., Diaz, N. L., Graells, M., Vasquez, J. C., Guerrero, J. M., (2016). Cooperative energy management for a cluster of households prosumers, *IEEE Trans on Consumer Elec.*, Cilt 62, Syf. 235-242. [10.1109/TCE.2016.7613189](https://doi.org/10.1109/TCE.2016.7613189)
- Luna, A. C., Diaz, N. L., Savaghebi, M., Vasquez, J. C., Guerrero, J. M., Sun, K., Chen, G., Sun, L. (2016). Optimal power scheduling for a grid-connected hybrid PV-wind-battery microgrid system, in *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, Syf. 1227-1234, Long Beach, CA, USA. [10.1109/APEC.2016.7468025](https://doi.org/10.1109/APEC.2016.7468025)
- Malekpour, A. R., Niknam, T., (2011). A probabilistic multi-objective daily Volt/Var control at distribution networks including renewable energy sources. *Energy-Elsevier*, Cilt 36, Sayı 5, Syf. 3477-3488. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.03.052>

- Mónica, A., Hortensia, A., Mircea, C., (2012). A multiobjective Var/Volt Management System in Smartgrids. *Energy Procedia*, Cilt 14, Syf. 490-1495. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.12.1122>
- Naina, P. M., Rajamani, H. S., Swarup, K. S., (2017). Modeling and simulation of virtual power plant in energy management system applications, in *7th International Conference on Power Systems (ICPS)*, Syf. 392-397, Pune, India. 10.1109/ICPES.2017.8387326
- Ramakrishna, G., Rao, N.D., (1999). Adaptive neuro-fuzzy inference system for volt:var control in distribution systems. *Electric Power Systems Research*, Cilt 49, Syf. 87-97. [https://doi.org/10.1016/S0378-7796\(98\)00073-X](https://doi.org/10.1016/S0378-7796(98)00073-X)
- Ranaweera, I., Mitgard, O. M., Korpas, M., (2017). Distributed control scheme for residential battery storage units coupled with PV systems, *Renewable Energy*, Cilt 113, Syf. 1099-1110. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.06.084>
- Resener, M., Haffner, S., Pereira, L. A., Panos, M. P., Ramos, M. J. S., (2019). A comprehensive MILP model for the expansion planning of power distribution systems-Part I: Problem formulation, *Electric Power System Research*, Cilt 170, Syf. 378-384. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.01.040>
- Resener, M., Haffner, S., Pereira, L. A., Panos, M. P., Ramos, M. J. S., (2019). A comprehensive MILP model for the expansion planning of power distribution systems-Part II: Numerical Results, *Electric Power System Research*, Cilt 170, Syf. 317-325, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.01.036>
- Zafar, R., Mahmood, A., Razzaq, S., Ali, W., Naeem, U., (2018). Prosumer based energy management and sharing in smart grid. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Cilt 82, Syf. 1675-1684. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.07.018>
- URL-1: <https://anaconda.org/conda-forge/glpk>