



A smart transformer application for voltage controlled home energy management system

Uğur S. Selamoğulları^{ID}, Onur Elma*^{ID}

Department of Electrical Engineering, Yıldız Technical University, Istanbul, 34220, Turkey

Highlights:

- A smart transformer design providing voltage control
- A smart transformer integrated home energy management system
- Experimental verification of the home energy management system

Keywords:

- Home energy management
- Smart transformer
- Demand response
- Voltage reduction
- Smart home

Article Info:

Received: 13.04.2017

Accepted: 10.08.2017

DOI:

10.17341/gazimmfd.416450

Acknowledgement:

This work was supported in part by Yıldız Technical University Research Projects Fund under Grant 2014-04-02-DOP01 and Istanbul Development Agency Fund under Grant KCE-27

Correspondence:

Author: Dr. Onur ELMA

e-mail:

onurelma@yildiz.edu.tr

phone: +90 212 383 5864

Graphical/Tabular Abstract

In this study, a smart transformer design for voltage controlled home energy management system is given. The power consumption of the house can dynamically be controlled by integrating the developed smart transformer to the new home energy management system so that the voltage level at the home entrance can be reduced based on a signal from the home energy management system. If this does not provide enough power reduction, then load shifting/load shedding together with the voltage control is implemented to further reduce the power consumption of the house. The developed smart transformer is experimentally validated at Smart Home Laboratory and it is seen that about %30 peak load reduction can be obtained using both voltage control and load shifting together.

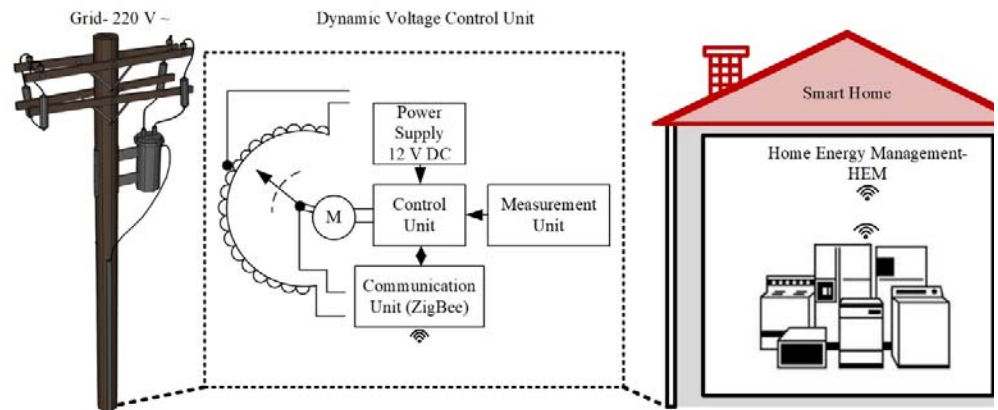


Figure 2. Block diagram of voltage controlled home energy management (HEM) system

Purpose: Develop a new home energy management method that minimizes the direct load control actions (load shifting and load shedding) and thus maximizes the customer comfort.

Theory and Methods:

In the new method, voltage reduction at the home electrical entrance is employed to control active power demand of the house during peak hours. Since the active power demand changes with the applied voltage for most home appliances, the power consumption of the house can be dynamically controlled using voltage reduction.

Results:

The developed smart transformer is experimentally validated at Smart Home Laboratory and it is seen that about %30 peak load reduction (from 5,1kW to 3,5kW) can be obtained using both voltage control and load shifting together.

Conclusion:

In this study, a smart transformer design for a new home energy management system based on voltage control is considered for a renewable energy supplied smart house. With the developed intelligent transformer structure, the voltage at the home entrance is reduced within the limits of technical standards ($\pm 10\%$) according to the signal coming from home energy management. Thus, power consumption of the house can be dynamically controlled. The smart transformer has been experimentally tested in the YTÜ smart home laboratory and it has been observed that peak power demand can be reduced by approximately 30% with the use of both voltage reduction and load control.



Gerilim kontrol tabanlı ev enerji yönetim sistemi için bir akıllı transformatör uygulaması

Uğur S. Selamoğulları^{1D}, Onur Elma*^{ID}

Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, Esenler, İstanbul, 34220, Türkiye

Ö N E Ç I K A N L A R

- Gerilim kontrolü sağlayan akıllı bir transformatör tasarımı
- Akıllı transformatör entegre edilmiş ev enerji yönetim sistemi
- Ev enerji yönetim sisteminin deneysel uygulanması

Makale Bilgileri

Geliş: 13.04.2017

Kabul: 10.08.2017

DOI:

10.17341/gazimmfd.416450

Anahtar Kelimeler:

Ev enerji yönetimi,
akıllı transformatör,
talep yönetimi,
gerilim azaltımı,
akıllı ev

ÖZET

Günümüzde elektrik enerjisinin daha verimli kullanılabilmesi, talep cevabı uygulamaları ile tüketicinin elektrik enerjisi kullanımının kontrollü hale getirilmesini gerekli kılmaktadır. Akıllı şebeke yapısı elektrik tüketimi tarafındaki talep cevabı uygulamalarının daha da yaygınlaşmasını sağlayacak bir alt yapı ortaya koymaktadır. Akıllı şebekelerin bir alt birimi olan akıllı evlerde, elektrik tüketiminin daha verimli ve kontrol edilebilir hale gelmesi amacıyla ev enerji yönetim algoritmaları üzerinde pek çok çalışma yapılmaktadır. Bu çalışmada gerilim kontrollü ev enerji yönetim sistemi için bir akıllı transformatör tasarımı verilmiştir. Geliştirilen yeni ev enerji yönetim sistemine akıllı transformatör yapısını entegre ederek ev enerji yönetim sisteminden gelen bir sinyale göre öncelikle evdeki gerilimin genliği azaltılarak evsel güç tüketimi dinamik olarak kontrol edilebilir hale getirilmektedir. Bu yeterli olmazsa, evdeki güç tüketimini daha da azaltmak amacı ile gerilim azaltımı ile birlikte yük ötelemesi de kullanılmaktadır. Geliştirilen akıllı transformatör yapısının uygulanabilirliği YTÜ Akıllı Ev Laboratuvarında deneysel olarak ortaya konmuştur ve hem gerilim azaltımı hem de yük ötelemenin birlikte kullanımı ile evin pik güç talebinin yaklaşık %30 oranında düşürülebildiği görülmüştür.

A smart transformer application for voltage controlled home energy management system

H I G H L I G H T S

- A smart transformer design providing voltage control
- A smart transformer integrated home energy management system
- Experimental verification of the home energy management system

Article Info

Received: 13.04.2017

Accepted: 10.08.2017

DOI:

10.17341/gazimmfd.416450

Keywords:

Home energy management,
Smart transformer
demand response,
conservation voltage
reduction,
smart home

ABSTRACT

Today, more efficient use of electrical energy requires that the demand on the customer side must be controlled through demand response applications. Smart grid structure provides a way to the widespread use of demand response applications at the customer side. Smart homes can be considered as the sub-unit of the smart grid and there are several studies on home energy management applications for more efficient and more controlled electrical energy use in these homes. In this study, a smart transformer design for voltage controlled home energy management system is given. The power consumption of the house can dynamically be controlled by integrating the smart transformer to the new home energy management system so that the voltage level at the home entrance can be reduced based on a signal from the home energy management system. If this does not provide enough power reduction, then load shifting/load shedding together with the voltage control is implemented to further reduce the power consumption of the house. The developed smart transformer is experimentally validated at YTU Smart Home Laboratory and it is seen that about %30 peak load reduction can be obtained using both voltage control and load shifting together.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: onurelma@yildiz.edu.tr / Tel: +90 212 383 5864

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde elektrik enerjisinin daha kontrollü ve verimli kullanılması amacıyla ‘akıllı şebekeler’ kavramı ortaya çıkmıştır. Akıllı şebekeler geleneksel elektrik enerji sisteminin haberleşme ve bilişim teknolojileri ile izlenebilir ve kontrol edilebilir hale getirilmesini kapsamaktadır. Akıllı şebekelerde enerji tüketiminin kontrollü ve verimli yapılması için genel olarak 4 başlık altında toplayabileceğimiz farklı yaklaşımlar bulunmaktadır. Bu yaklaşımlar; talep cevabı (demand response-TC), talep tarafı yönetimi (demand side management- TTY), yük atma (load shedding) ve yük öteleme (load shifting) olarak sıralanabilir [1-3]. Özellikle yük (talep) tarafının kontrol edilip, yönetilebilmesi elektrik enerjisinin verimli kullanımının artırılmasında ve kayıpların minimize edilmesinde büyük önem taşımaktadır. Toplam elektrik enerjisi talebinin içerisinde evlerde tüketilen elektrik enerjisi ciddi bir paya sahiptir. Bunu örneklemek gerekirse; Türkiye’de evlerdeki elektrik enerjisi tüketimi toplam elektrik enerjisi tüketiminin yaklaşık %25’ini oluşturmaktadır [4]. Amerika Birleşik Devletleri’nde bu oran %35 civarındadır [5]. Bu sebeple, evlerdeki elektrik enerjisi tüketiminin kontrol edilebilmesi ile daha verimli bir enerji kullanımı sağlanabilir. Bu sayede, sistemin verimliliğini artırmanın (kayıpların azaltılması) yanında karbon salınımında azalma sağlanabilecek, pik (yüksek talep anları) zamanlarda yük talebi kontrol edilebilecek ve arz-talep dengesi en verimli şekilde korunacaktır.

Evsel elektrik enerjisi tüketiminin kontrol edilebilmesi için kolay ve uygulanabilir bir çözüm mevcut akıllı şebeke ağı ile bağlantı sağlayabilecek evsel bir kontrol ve haberleşme ağı oluşturmaktır. Bu haberleşme yapısı ile TTY uygulamaları daha da yaygınlaşacak ve elde edilecek fayda artacaktır. Bu uygulamalardan fiyat tabanlı talep yönetimi (FTTY) altında yaygın olarak dinamik fiyatlandırma tarifeleri kullanılmaktadır. Dinamik fiyatlandırma modelinde, zamana göre değişen fiyat bilgisi sürekli olarak ilgili dağıtım şirketinden alınmaktadır ve yüklerinin çalışma zamanları fiyat bilgisine göre belirlenmektedir. Tüketicinin enerji kullanımının bu dinamik değişime uygun yönetilmesi ile hem şebeke hem de tüketici açısından avantajlı bir elektrik enerjisi kullanımı gerçekleştirilebilir. Bu amaçla yapılmış çalışmalarda dinamik fiyat tarifelerine göre ev enerji yönetimi ile anlık güç tüketiminde ve tüketici faturalarında olumlu etkiler elde edildiği belirtilmiştir [6-8].

TTY altında yapılan çalışmalarda tüketicinin anlık güç tüketiminin farklı yöntemler ile kontrol edilebilmesi (yönetilebilmesi) önemlidir. Literatürde genel olarak elektrikli cihazlar kontrol edilebilir ve kontrol edilemez cihazlar olarak sınıflandırılmaktadır ve buna bağlı olarak cihazların ötelenmesi, devreden çıkarılması ve/veya çalışma zamanlarının planlanması gibi yöntemler ile güç tüketimleri kontrol edilmektedir. Elektriksel olarak tüketilen aktif gücün akım ve gerilim ile ilişkisi bilinen bir gerçektir ve yük modelleri buna bağlı olarak oluşturulmaktadır [9]. Bu

modellerin incelendiğinde yüklerin önemli bir kısmının tükettiği gücün uygulanan gerilim ile orantılı olarak değiştiği görülmektedir. Gerilim-güç arasındaki bu ilişki pik yüklenmenin azaltılması ve enerji verimliliği elde etmek amacıyla özellikle elektrik dağıtım sistemlerinde kazanımlı gerilim azaltımı (KGA) [Conservation Voltage Reduction-CVR] adı altında çeşitli şekillerde uygulanmıştır [10]. KGA temel olarak gerilim-güç tüketimi ilişkisinden faydalanılarak gerilimin belirli bir oranda azaltılması ile güç tüketiminin azaltılması olarak açıklanabilir. Bu konuda yapılan bir çalışmada gerilim seviyesinde yapılan %1’lik azalma ile enerji tüketiminde %1,14’lük bir verim elde edilmiştir [11]. Yapılan başka bir çalışmada ise %2,5’luk bir gerilim azaltımı ile %1’lik bir enerji tasarrufu sağlandığı belirtilmektedir [12]. Dünyada elektrik enerjisi tüketimi yüksek olan ülkelerin başında gelen Amerika Birleşik Devletleri’nde tüm dağıtım fiderlerinde KGA uygulandığında ülke genelindeki toplam enerji tüketiminde yaklaşık %3’lük bir azalma sağlanacağı belirtilmiştir [13]. Yapılan bazı çalışmalarda gerilim azaltımının sistemde oluşan kayıpların azaltılmasında ve enerji kalitesini arttırmada olumlu etkileri olabileceğini üzerinde durulmuştur [14]. Gerilim azaltımının tüketimde sağlayacağı verimlilik karbon salınımının azaltılmasına da direkt ve dolaylı katkı sağlayacaktır.

KGA çalışmaları daha çok dağıtım sistemleri üzerinde merkezi olarak ele alınmakla birlikte lokal olarak uygulanması konusunda da çalışmalar yapılmaya başlanmıştır. Lokal uygulamalarda bir evdeki enerji tüketiminde azalma sağlamak ve/veya pik yüklenmelerin azaltılmasını sağlamak için farklı uygulama örnekleri önerilmektedir. KGA yöntemi ile enerji verimliliğinin yanında pik yüklenmelerde de ciddi kazanımlar sağlanabilmektedir. Bu konuda yapılmış bir çalışmada gerilim azaltımı ile pik yüklenmelerde %18’e varan bir azalma elde edilmiştir [15]. Bu uygulama örneklerinin birinde akıllı prizler üzerinden cihazların gerilimlerinin azaltılması ile güç tüketimlerinde azalma sağlanması üzerinde durulmuştur. Priz ile yapılan gerilim azaltımında kısıtıcı bir devre kullanıldığından, bu yöntem ile oluşabilecek harmoniklerden de bahsedilmiştir [16]. Başka bir çalışmada ise akıllı prizler ile yapılacak gerilim kontrollü ev enerji yönetimi ile evsel pik yüklenmenin cihazların çalışmasının ötelenmesine gerek kalmadan yapılabileceği ve böylece tüketici konforunun maksimize edilebileceği vurgulanmıştır [17].

Bu çalışmada, evlerde KGA yöntemini uygulamak amacıyla bir akıllı transformatör geliştirilmiştir. Geliştirilen akıllı transformatör yapısı ile gerçek zamanlı fiyat (GZF), yenilenebilir enerji üretim miktarı, pik yüklenme durumu bilgisi, kullanıcı tarafından belirlenen limit güç değeri gibi parametrelerin değişimine göre üretilen bir kontrol sinyali ile ev giriş geriliminin genliği azaltılarak evsel elektrik güç tüketimi dinamik olarak kontrol edilebilir hale getirilmiştir. Ev giriş gerilimi teknik standartlarda belirtilen sınırlar içerisinde kalacak şekilde kontrol edilmektedir. Geliştirilen akıllı transformatör yapısı Akıllı Ev Laboratuvarında (AEL)

deneysel olarak test edilmiş ve istenilen performansın elde edilebildiği ortaya konulmuştur. Literatürde yaygın olarak karşımıza çıkan yük öteleme veya yük atma gibi yöntemler ile karşılaştırıldığında akıllı transformatör entegre edilmiş ev enerji yönetim sistemi ile cihazların çalışmasına doğrudan müdahale en aza indirilmekte ve tüketici konforu maksimize edilmektedir. Bunun yanında yenilenebilir enerji kaynaklarından beslenen bir evde bu kaynaklardan daha etkin bir şekilde faydalanılabilecek bir kullanım ortaya konulmuştur.

2. UYGULANAN GERİLİM İLE EVSEL YÜKLERİN GÜÇ TÜKETİMLERİ ARASINDAKİ İLİŞKİ (RELATIONSHIP BETWEEN APPLIED VOLTAGE AND POWER CONSUMPTION OF APPLIANCES)

Bir elektrikli cihazın harcadığı elektriksel güç, cihaza uygulanan gerilime bağlı olarak değişim gösterebilmektedir. Cihaz uçlarındaki gerilim düşürülerek pek çok cihazın güç tüketimi kontrol edilebilmektedir. Bu konuda yapılan ilk çalışmalar 1970'li yıllara dayanmaktadır [10]. Bu çalışmalarda gerilim kontrolünün (Conservation Voltage Reduction-CVR) daha çok dağıtım sistemlerinde kullanılması dikkate alınmıştır [18]. Ancak, gerilim azaltımının evsel güç tüketiminin kontrolünde kullanılması EEE sistemleri için alternatif bir potansiyele sahiptir. Bu açıdan, evlerde yaygın kullanılan cihazların uygulanan gerilim ile güç tüketimleri arasındaki ilişkinin detaylı olarak incelenmesi gereklidir.

Evsel elektrikli yükler temel olarak omik yükler, omik-endüktif yükler ve anahtarlamalı güç kaynaklı yükler olarak sınıflandırılabilir. Omik karakteristikli yükler daha çok ısıtma amaçlı kullanılan elektrikli cihazları kapsamaktadır ve ütü, fırın, elektrikli ocak, elektrikli su ısıtıcısı, elektrikli soba, akkor flamanlı lamba gibi evsel elektrik talebinin büyük kısmını oluşturan yükleri kapsamaktadır. Ayrıca çamaşır ve bulaşık makinesi gibi cihazlarda kendi içlerinde su ısıtıcısı bulunduklarından kısmen omik yük olarak ele alınabilir. Omik-endüktif yükler ise çamaşır makinesi, bulaşık makinesi, süpürge, aspiratör, klima ve buzdolabı gibi içerisinde elektrikli motor bulduran cihazlardır. Anahtarlamalı güç kaynaklı yükler ise kendi içerisinde bir güç elektroniği dönüştürücüsüne sahip olan cihazları kapsamaktadır. Bu kategorideki yüklere örnek olarak bilgisayar, yazıcı ve monitör gibi elektronik cihazlar gösterilebilir. Omik ve omik-endüktif karakteristikli yüklerin uçlarındaki gerilim azaltılırsa, bu yüklerin çektiği elektrik gücü de azaltılabilir. Anahtarlamalı güç kaynaklı yüklerde gerilim azaltımının cihazın çektiği güç üzerinde kayda değer bir etkisi bulunmamaktadır.

Gerilim değişiminin evsel elektrikli cihazların güç tüketimleri üzerindeki etkisini belirleyebilmek amacı ile AEL'de bulunan evsel elektrikli cihazların Yokogawa CW240 güç analizörü kullanarak 220V ve 200V gerilim değerlerinde ölçülen güç değerleri Tablo 1'de özetlenmiştir [15]. Yapılan ölçümler neticesinde evdeki 20 adet cihazın yaklaşık %70'inde gerilim azaltımı ile güç tüketiminde bir düşüş elde edilebildiği görülmüştür. Ölçümlerde dikkate

alınan %10'luk gerilim düşümü değeri Türkiye için Enerji Piyasası Denetleme Kurumu'nun (EPDK) Elektrik Dağıtım Parakende Satış Hizmet Kalitesi Yönetmeliğine göre belirlenmiştir [19].

3. AKILLI EVLER (SMART HOMES)

Akıllı evlerin temelleri akıllı şebekeler kavramının öncesinde daha çok tüketici konforunu ön planda tutan ev otomasyon sistemleriyle ortaya çıkmıştır [20]. Günümüzde çevresel hassasiyet ile enerji arzında oluşabilecek sorunlar enerji verimliliğini önemli hale getirmiş ve enerji verimliliği ile birlikte akıllı evlere yeni bir misyon yüklenmiştir. Akıllı şebekeler temelinde yapılan akıllı ev çalışmaları, evlerin şebeke ile ve/veya bulunması durumunda yenilenebilir enerji kaynakları ile iletişimde olduğu, dinamik fiyatlandırmalara adapte olabilen ve konfor ile birlikte daha kontrollü elektrik enerjisi tüketimi sağlayan bir enerji mimarisini kapsamaktadır. Bu sistemin oluşturulmasındaki anahtar röle haberleşme alt yapısı oluşturmaktadır. Akıllı şebekelerdeki haberleşme yapısı 3 başlıkta incelenmektedir [21] :

- Geniş alanlı iletişim ağı (wide area network- WAN).
- Bölgesel alanlı iletişim ağı (field area network-FAN).
- Ev içi iletişim ağı (home area network-HAN).

Akıllı evlerin haberleşme alt yapısı HAN altında incelenmektedir. Bunun yanı sıra akıllı sayaçlar ile elektrik şirketleri arasındaki iletişim için kullanılan ağ yapısı ise gelişmiş ölçüm altyapısı (advanced metering infrastructure-AMI) olarak isimlendirilmektedir. Akıllı şebekeler ve akıllı ev arasındaki haberleşme yapısına ait blok diyagram Şekil 1'de verilmiştir.

Akıllı evlerde kullanılan HAN'da kablolu ve kablosuz haberleşme teknolojileri kullanılmaktadır. Bu teknolojilerden kablosuz haberleşme yapıları akıllı evlerde daha çok kullanım alanı bulmaktadır. Yakın gelecekte yaygın olarak kullanılmaya başlanacak akıllı elektrikli ev cihazları ile akıllı ev enerji yönetim sistemi arasında kablosuz haberleşme teknolojilerinin daha da ön plana çıkacağı söylenebilir. Bu nedenle, geliştirilen akıllı transformatör yapısında ZigBee kablosuz haberleşme yapısı kullanılmıştır.

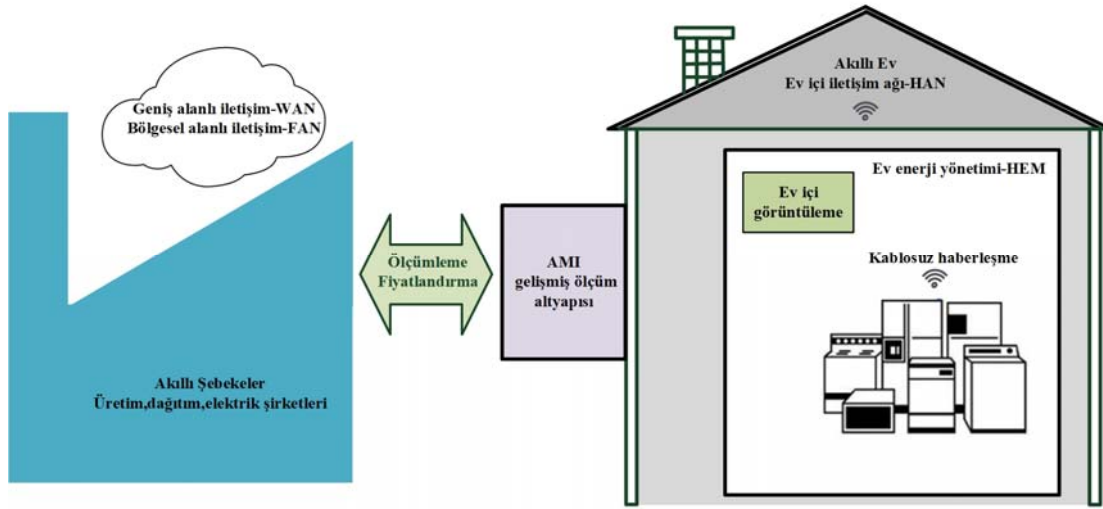
Geliştirilen akıllı transformatör yapısı AEL'de test edilmiştir. AEL bir inverter üzerinden şebeke ile bağlantılı yenilenebilir enerji kaynaklarına ve enerji depolama sistemine sahiptir. Yük tarafında ise evsel elektrikli cihazlar bulunmaktadır. AEL ile ilgili detaylı açıklamalar önceki çalışmalarda verilmiştir [15].

4. AKILLI TRANSFORMATÖR TASARIMI VE EV ENERJİ YÖNETİM SİSTEMİ (SMART TRANSFORMER DESIGN AND HOME ENERGY MANAGEMENT SYSTEM)

Geliştirilen akıllı transformatör yapısı temel olarak dört modülden oluşmaktadır: güç modülü, haberleşme modülü,

Tablo 1. Evsel elektrikli cihazların farklı gerilimlerdeki güç tüketimleri ve güç tüketimindeki yüzdesel değişim (Powers consumption of residential appliances at different voltage levels and the percent changes in power consumptions)

Elektrikli cihazlar	Ölçülen güç (W) [220 V]	Ölçülen güç (W) [200 V]	Yüzdesel güç değişimi (%)	Elektrikli cihazlar	Ölçülen güç (W) [220 V]	Ölçülen güç (W) [200 V]	Yüzdesel güç değişimi (%)
Buzdolabı	160	150	6,25	Elektrikli ısıtıcı	1790	1450	19
Ütü	1970	1600	18,8	Saç düzleştirici	140	110	21,43
Tost makinesi	700	600	14,3	Fırın	2150	1740	19,07
Kettle	1700	1400	17,7	Aspiratör	190	170	10,52
Saç kurutma	1400	1200	14,3	Bulaşık makinesi	1780	1450	18,08
TV	88	88	0	Mikrodalga	1200	1050	12,5
Telsiz telefon	2	2	0	Yazıcı	9	9	0
Bilgisayar	55	55	0	Süpürge	1500	1250	17
Monitör	17	17	0	Elektrikli ocak	1050	850	19,05
LED aydınlatma	532	532	0	Bulaşık makinesi	1810	1500	17,13
Akkor flamanlı lamba	100	79	21	Klima	870	820	5,8

**Şekil 1.** Akıllı şebekeler ve akıllı ev arasındaki haberleşme yapısına ait blok diyagramı (The block diagram of the communication structures between the smart grid and the smart home)

ölçüm modülü ve kontrol modülü. Transformatör olarak bir oto-transformatör kullanılmıştır. Haberleşme modülü üzerinden alınan sinyale göre ev giriş gerilimi teknik standartlarda belirtilen %10 değerinde azaltılmaktadır. Bu amaçla oto-transformatörün kayar ucu bir DC motor üzerinden kontrol edilmektedir. Ölçüm modülü ile ev giriş geriliminin istenilen değerde olduğu kontrol edilmektedir. Gerilim kontrollü EEY sistemine ait blok diyagram Şekil 2'de verilmiştir.

Şebeke gerilimi 220V ise %10'luk gerilim azaltımı ile elde edilecek gerilim değeri 198V olmaktadır. Deneysel çalışmada gerilimin alt değeri yük değişimine bağlı oluşabilecek gerilim değişimleri için 2 V'luk bir tolerans dikkate alınarak 200V olarak kabul edilmiştir. Böylece oluşabilecek küçük gerilim dalgalanmaları sebebiyle standartların dışına çıkılmasına karşı bir önlem alınmıştır. Geliştirilen EEY yazılımı ile yük tarafından çekilen güç değeri, yenilenebilir enerji kaynakları tarafından üretilen güç

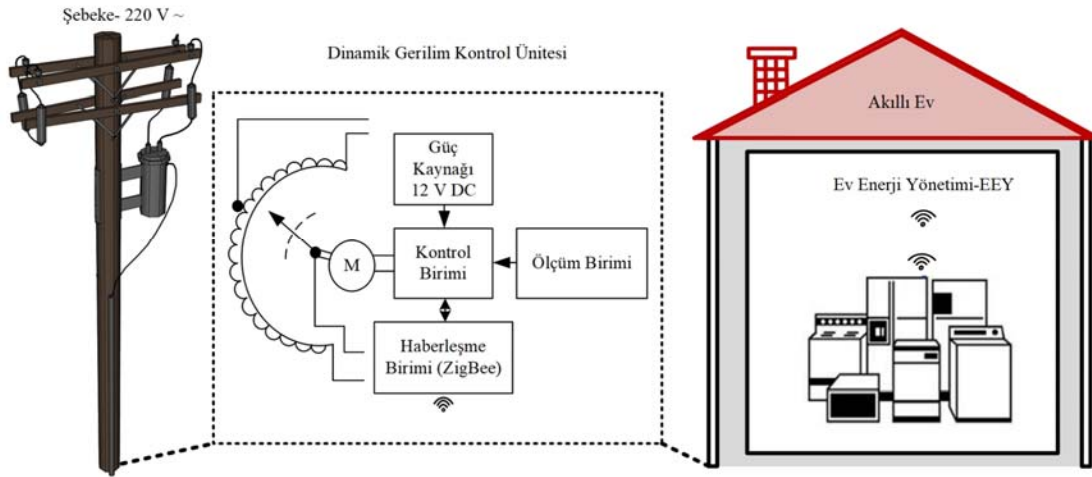
değerleri, batarya şarj durumu (SOC) ve şebeke tarafından sağlandığı varsayılan GZF bilgisi aynı anda dikkate alınarak bir kontrol kararı üretilmektedir.

AEL’de kullanılan akıllı prizlerden alınan bilgiler prize bağlı cihazın çektiği güç, enerji ve rölenin konumu olmak üzere 3 tanedir. Akıllı prizlere kontrol komutu olarak sadece röle açma/kapama sinyali gönderilebilmektedir. Akıllı prizler ile ana bilgisayar arasındaki haberleşme ağ geçidi aracılığıyla yapılmaktadır. Işınım, sıcaklık ve rüzgar hızı gibi verilerin toplanması için Ammonit hava istasyonu ile haberleşme sağlanmaktadır. Gerilim değerini ayarlamak için akıllı transformatör üzerinden sürekli ölçümü yapılan ev giriş gerilimi değeri EEY merkezine iletilmektedir. GZF, yenilenebilir enerji üretim miktarı, pik yüklenme durum bilgisi, kullanıcı tarafından belirlenen limit güç değeri gibi parametrelerin karar anındaki değerleri dikkate alınarak EEY sisteminden gönderilen bir sinyale göre ev giriş gerilimi akıllı transformatör yapısında bulunan DC motor üzerinden kontrol edilebilmektedir. DC motorun dönüş yönü değiştirilerek ev giriş geriliminin değeri hem düşürülebilmekte hem de artırılabilir. Sistemdeki tüm

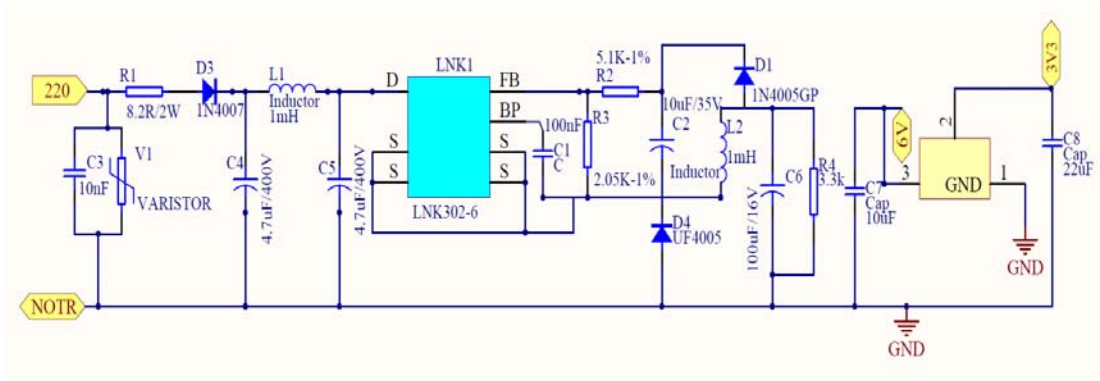
donanımlar uygun haberleşme protokolleri ile EEY sistemine bağlıdır. Böylece gerekli veri okumaları yapıp algoritmadan gelen kontrol sinyalleri sistemdeki donanımlara gönderilebilmekte ve sistem bir bütün olarak en ideal enerji kullanımını sağlamaktadır. Bu kısımda geliştirilen akıllı transformatörün iç yapısında bulunan birimler detaylı olarak açıklanmıştır. Akıllı transformatör yapısında Güç kaynağı birimi, Ölçüm birimi, Kontrol birimi ve Haberleşme birimi olmak üzere 4 birim bulunmaktadır.

4.1. Güç Kaynağı Birimi (Power Supply Unit)

Akıllı transformatör içerisinde bulunan donanımların ve aktif devre elemanlarının çalışabilmeleri için farklı besleme gerilimlerine ihtiyaç vardır. Genel olarak güç kaynağı birimi akıllı transformatör girişinde bulunan 220V AC gerilim değerini kullanılan mikroişlemcinin besleme gerilimi olan 3,3V DC gerilim seviyesine düşürmektedir. Bu amaç ile içerisinde anahtarlamalı devre elemanlarının yer aldığı “link-switch” entegre kullanılmıştır ve gerekli ek devre gereksinimleri sağlanmıştır. Şekil 3’te tasarlanan güç kaynağı devresinin şematığı verilmiştir. Şekil 3’te görüldüğü



Şekil 2. Gerilim kontrollü ev enerji yönetim (EEY) sistemine ait blok diyagram
(Block diagram of voltage controlled home energy management (HEM) system)



Şekil 3. Güç kaynağı birimine ait şematik (The schematics of the power supply unit)

gibi 220V şebeke gerilimi diyot üzerinden doğrultulduktan sonra “link-switch (LNK)” entegresine gelmektedir. Entegre çıkışından alınan değer regüle edilerek 3,3V seviyesine düşürülmektedir. Ayrıca, deneysel çalışmada kullanılan oto transformatörün çıkış gerilimini ayarlama için kullanılan kayar ucunu kontrol etmek amacıyla 12V DC gerilim ile beslenen bir DC motor kullanılmaktadır. 12V kaynak ve DC motor üretici firma tarafından oto transformatöre entegre olarak sağlanmıştır. DC motor sürücü devresinde kullanılan 4 adet röle de 12V DC kaynaktan beslenmektedir.

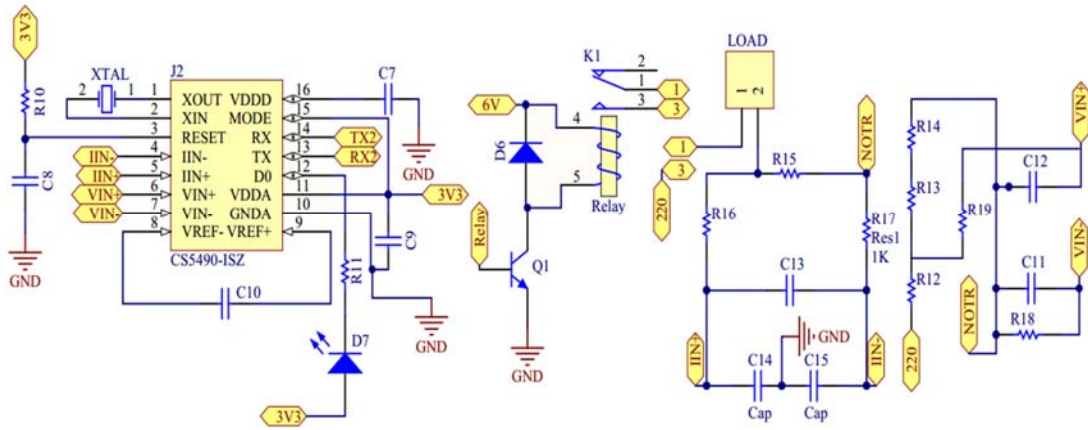
4.2. Ölçüm Birimi (Measurement Unit)

Akıllı transformatörün en iyi şekilde gerilim ayarlaması yapılabilmesi için bir ölçüm birimi kullanılmıştır. Ölçüm birimi ile gerilim değeri bilgisi gerilim bölücü bir devre üzerinden analog dijital konvertör (ADC) yardımıyla kolayca hesaplanmıştır. Burada önemli olan gerilim okumasının kalibre edilmesi ve ölçülen gerilim bilgisinin hızlı ve hatasız olarak değerlendirme merkezi olan işlemciye yönlendirilmesidir. Ölçüm devresi gerektiğinde

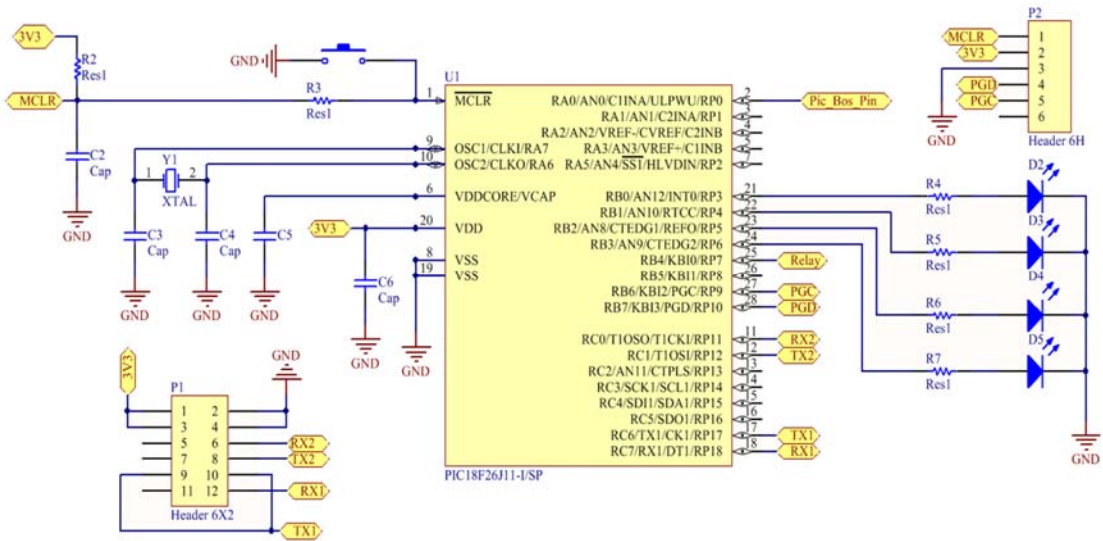
kullanılabilmesi amacıyla akım ölçümü yapabilecek şekilde tasarlanmıştır. Böylece, gerektiğinde akıllı transformatörün güç değerleri de hesaplanıp EEE sistemine iletebilecektir. Ölçüm katında Cirrus firmasına ait CS5490-ISZ adlı güç ölçüm entegresi kullanılmıştır. Ölçüm devresine ait şematik Şekil 4’te verilmiştir.

4.3. Kontrol Birimi (Control Unit)

Akıllı transformatörün kontrol katı hem güç ölçüm entegresinden alınan bilgilerin işlenip EEE sistemine gönderildiği hem de EEE sisteminden gelen komutlara göre oto-transformatörü kontrol eden DC motorun kontrolünü sağlayan donanımsal yapıyı içermektedir. Prototip devre kontrol katında Microchip 18F26J11 entegresi (MCU) kullanılmıştır. İşlemci için oluşturulan şematik Şekil 5’te verilmiştir. Kullanılan MCU 2 adet UART çıkışına sahiptir. Bunlardan bir tanesi güç ölçüm entegresi (CS5490 ISZ) ile diğeri de haberleşme katında bulunan ZigBee ile haberleşmek için kullanılmaktadır. MCU güç ölçüm entegresinden aldığı ölçüm bilgilerini içeride derledikten



Şekil 4. Ölçüm birimi şematiği (The schematics of the measurement unit)



Şekil 5. Kontrol birimi şematiği (The schematics of the control unit)

sonra kullanıcı arayüzüne iletilmesi için ZigBee haberleşme birimine göndermektedir. Bu amaç ile güç ölçüm entegresinden gelen 24 bitlik ölçüm bilgileri UART ile işlemciye aktarmaktadır. İşlemci yazılımındaki ölçüm yapısı ile bu bilgiler alınmakta ve gerekli düzenlemeler yapılmaktadır. Düzenlenen veriler değerlendirilmekte ve ZigBee ile kullanıcı arayüzüne aktarılmaktadır. Bu haberleşme işlemci ile EEY sistemi arasında çift yönlü olarak gerçekleşmektedir. Zamanlayıcı yapısında işlemcinin “timer” özelliği kullanılmaktadır. Bu özellik ile işlemci içerisinde sürekli saydırma yapılmakta ve belirlenen değere geldiğinde işlemci tarafından “çıkış” üretilmesi sağlanmaktadır. Böylece, akıllı transformatörün çıkışında istenilen gerilim değeri oto-transformatörün kayar çıkış ucunun bir DC motorun sürme devresinde bulunan rölelerin işlemci üzerinden yön ve süre kontrollü bir şekilde sürülmesiyle elde edilmektedir. Kullanılan DC motora uygulanan DC gerilimin polaritesi değiştirilerek oto-transformatörün kayar çıkış ucunun konumu açık çevrim kontrol edilmiştir. Deneysel çalışmada kullanılan iki gerilim seviyesinin elde edilmesi 12V'luk DC motor sürme sinyalinin polaritesi ve doluluk oranı ile belirlenmektedir. Oto-transformatör yapısı ile gerilimin $\pm 1V$ değişimi için sürme sinyalinin süresinin 11ms olması gerektiği deneysel olarak bulunmuştur. Referans gerilim değeri ile ölçülen gerilim değeri arasındaki fark elde edilen 11ms değeri ile çarpılarak istenilen gerilim seviyesini elde etmek için gerekli sürme sinyali süresi hesaplanmakta ve DC motora uygulanmaktadır.

Ev giriş gerilimini 220V değerinden 200V değerine düşürmek veya 200V değerinden 220V değerine çıkarmak için DC motora uygulanan 12V'luk gerilimin $20 \times 11 = 220$ ms uygulanması gerekmektedir. Buradan, $\Delta V / \Delta t = 90,90V/s$ olarak hesaplanmıştır. Farkın negatif veya pozitif olması DC motorun dönüş yönünü belirlemek için kullanılmaktadır. Bu çalışmadaki amacımız açısından oto-transformatörün açık çevrim kontrolü yeterlidir. Ancak, geliştirilen akıllı transformatör yapısının ticari ürün haline getirilebilmesi için kapalı çevrim kontrol gereklidir.

4.4. Haberleşme Birimi (Communication Unit)

EEY sistemi ile haberleşme için akıllı transformatör kontrol devresindeki haberleşme sisteminde ZigBee kablosuz haberleşme yapısı kullanılmıştır. ZigBee haberleşme yapısı kablosuz haberleşme yapıları arasında en düşük güç tüketimine sahip seçeneklerden biridir ve kapalı ortamlarda 30 metreye kadar kullanılabilir. Haberleşme birimine ait şematik Şekil 6'da gösterilmiştir. Haberleşme birimi ölçüm verilerinin kontrol katından geçerek EEY sistemine iletilmesini ve yine EEY sisteminden gelen komutların kontrol katına iletilmesini sağlamaktadır. Açıklanan alt donanımlarıyla birlikte geliştirilen akıllı transformatör yapısına ait fotoğraflar Şekil 7'de verilmiştir. Geliştirilen akıllı transformatör yapısı yazarlar tarafından daha önce geliştirilen dinamik EEY sistemine entegre edilmiştir. EEY sisteminde GZF, yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen güç, bataryaların doluluk oranı, tüketici tarafından belirlenen

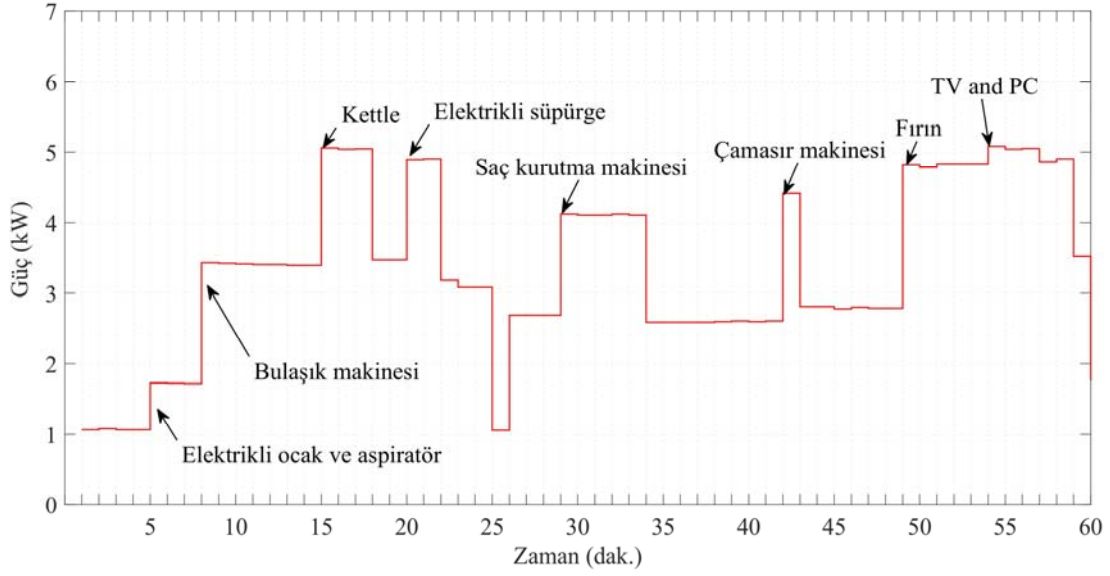
limit güç değeri, vb. gibi parametreler dikkate alınarak hem yük hem de kaynak tarafı koordineli bir şekilde işletilebilmektedir. EEY sistemi ile evdeki elektrik tüketiminin tüketici tarafından belirlenen limit güç değeri üzerinde olması durumunda öncelikli olarak ev giriş gerilimini teknik standartların izin verdiği oranda azaltarak evin güç tüketimi düşürülmektedir. Eğer gerilim azaltımı ile evdeki güç tüketimi istenilen seviyeye düşürülemezse tüketici tarafından daha önceden belirlenen yüksek güç tüketimine sahip cihazların çalışmaları akıllı prizler üzerinden ötelenmektedir.

Geliştirilen akıllı transformatör yapısı ile EEY sistemi üzerinden öncelikli olarak gerilim azaltımının kullanılmasının avantajı cihazların ötelenmesini azaltarak tüketici konforunun maksimize edilmesidir. Ayrıca, şebeke tarafındaki pik yüklenmenin düşürülmesi de sağlanmaktadır ve hava şartlarına göre çıkış gücü çok değişken olan rüzgar türbini ve solar panellerden üretilen enerji batarya kapasitesini de kullanarak en uygun şekilde ev ve şebeke arasında paylaştırılmaktadır [22]. Kullanılan EEY sistemine ait detaylar izleyen kısımda verilmiştir.

5. DENEYSEL ÇALIŞMA (EXPERIMENTAL STUDY)

AEL'de bir günlük yük profilini uygulamanın zorluğundan dolayı, deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere örnek bir yük profili oluşturulmuştur. AEL'de bulunan cihazların güç değerlerini dikkate alınarak oluşturulan 1 saatlik örnek yük profilinin zamana göre değişimi Şekil 8'de verilmiştir. Akıllı transformatör yapısının entegre edildiği EEY sisteminde GZF, SOC, P_{limit} , $P_{üretim}$ gibi parametreler dikkate alınmış ve yük tarafının kontrolünde öncelikle gerilim azaltımı sonrasında gerekli ise yük ötelenmenin kullanıldığı bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Kullanılan EEY sistemine ait algoritmanın akış diyagramı Şekil 9'da verilmiştir.

Algoritmanın başlangıcında EEY sistemindeki tüm donanımlar başlangıç koşullarına getirilmektedir. Daha sonra yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilebilecek güçlerin hesaplamasında kullanılan meteorolojik veriler (ışınım, sıcaklık ve rüzgar hızı) alınmakta ve 5 dakika sonrası için lokal enerji kaynaklarından üretilebilecek güç ($P_{üretim}$) tahmini yapılmaktadır. Bu amaçla algoritma başlatıldıktan sonra 5 dakika boyunca her dakikada hava istasyonundan rüzgar hızı, ışınım ve sıcaklık verileri alınmaktadır. Daha sonra hava verilerinin tahmininde kullanılan geçmiş veriler dizisine eklenen bu 5 yeni veri ile birlikte tahmin algoritması sonraki 5 dakika için rüzgar hızı, ışınım ve sıcaklık değerlerini vermektedir. Bu veriler rüzgar türbini ve FV panel modellerine girilerek 5 dakika sonrası için yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilebilecek toplam güç değeri hesaplanmaktadır. Rüzgar türbini ve FV panellerin üretecekleri güçlerin toplamı ($P_{üretim}$) ise P_{net} değerinin hesaplanmasında kullanılmaktadır. Kullanılan tahmin yöntemi, rüzgar türbini ve FV modelleri referans [22] 'de detaylı olarak verilmiştir. Tahmin edilen $P_{üretim}$ değeri ile evdeki güç tüketimi ($P_{yük}$) arasındaki fark alınarak Eş. 1'de verildiği gibi net güç (P_{net}) hesaplanmaktadır.



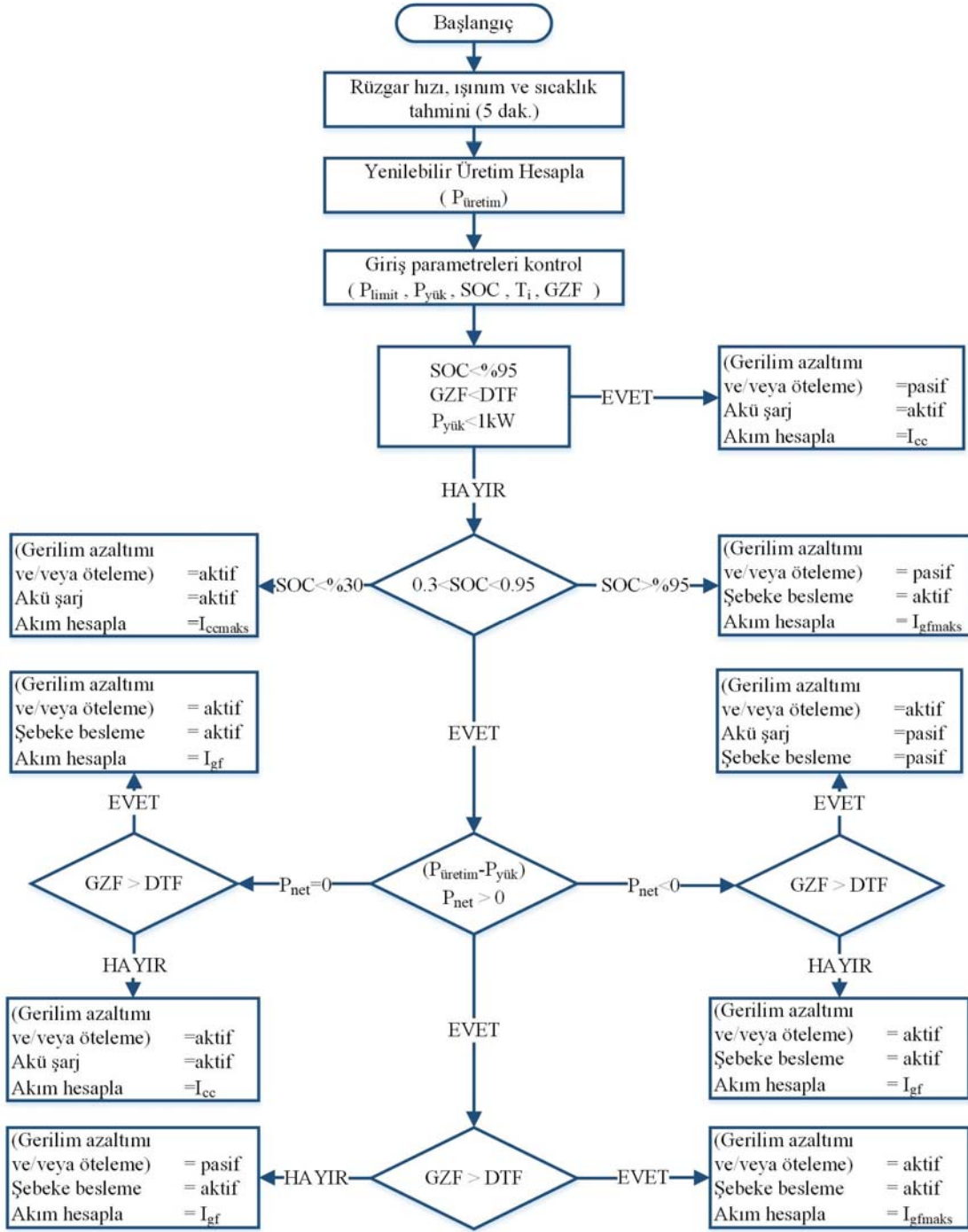
Şekil 8. Deneysel çalışmada kullanılan 1 saatlik örnek yük profili (Generated 1-hour load profile for the experimental study)

bölünmesiyle elde edilmiştir. Bu değer normal koşullar dikkate alındığında akıllı ev laboratuvarındaki bataryalar için 23 A'lık bir akıma karşılık gelmektedir. Fakat SOC için alt limit olarak belirlenen %30'un altına düştüğünde (bataryaların deşarj derinliğinin artmasının batarya ömrüne olumsuz etkisini ortadan kaldırmak için) bataryaların doluluk oranını hızlı bir şekilde bu kritik seviyenin üzerine çıkarmak gerekmektedir [23]. Bataryaların SOC değerini kritik değer üzerine çıkarmak için gerekli şarj akımı (I_{cemaks}) hesabında, Eş. 4'te verilen eşitlik kullanılmıştır. Bataryaların ömrü dikkate alındığında şarj akımının batarya akım kapasitesinin 1/10'unu aşmaması gerekmektedir [24,25].

$$I_{cemaks} = (P_{akti} \times 0,10) / V_{DC} \quad (4)$$

Geliştirilen algoritmada bir diğer yenilik GZF'nin kontrol kararlarında dikkate alınmasıdır. GZF'nin yakın gelecekte yaygınlaşacağı düşünüldüğünden geliştirilen EEY algoritması bu fiyatlandırma yöntemine göre tasarlanmıştır. Bu amaçla bir gün için oluşturulan ve 5 dakikalık aralıklarla değişen örnek bir GZF grafiği Şekil 11'de verilmiştir. Şekil 10'da GZF'ye örnek olarak verilen grafikte değişken temel fiyat (DTF) referans bir fiyat olarak kullanılmıştır. Böylece GZF'nin anlık değerinin yüksek veya düşük olduğunun algoritma tarafından kıyaslaması yapılabilmektedir. DTF grafiği olarak Türkiye'de kullanılan 3 kademeli elektrik tüketim tarifesi dikkate alınmıştır. Yük tarafındaki güç tüketiminin yüksek veya düşük olduğuna karar verebilmek için tüketici tarafından belirlenen bir limit güç değeri (P_{limit}) kullanılmıştır. Belirlenen bu değer ile mevcut güç tüketimi karşılaştırılarak gerilim azaltımı ve yüklerin öncelik durumlarına göre ötelenmesinin kararları verilmektedir. Geliştirilen algoritmada P_{limit} ile birlikte, YEK'ten elde edilebilecek güç tahminleri ve şebekeden geldiği varsayılan GZF bilgisi de dikkate alınmaktadır. Böylece cihazların çalışmasına minimum seviyede müdahale edilerek tüketici

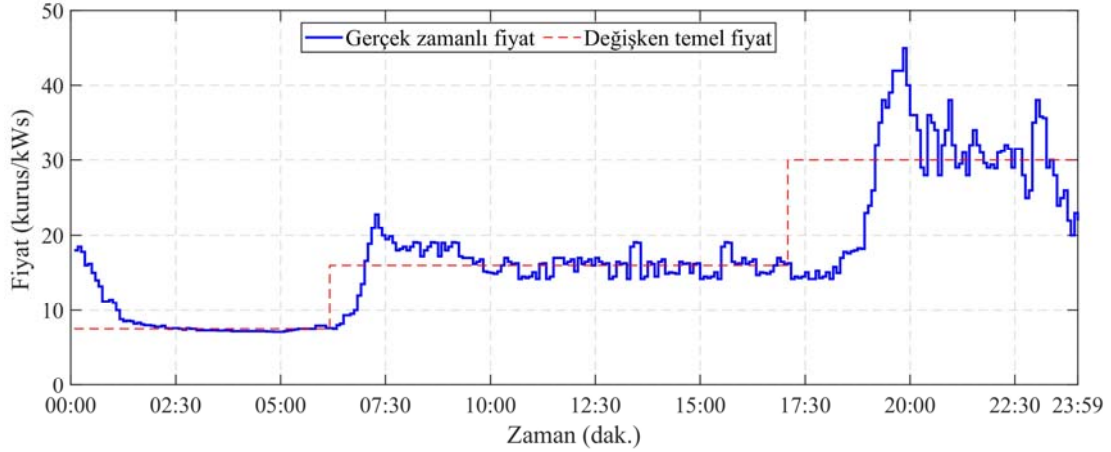
konforu maksimize edilmekte ve YEK'ten maksimum fayda sağlanmaktadır. Bunun yanında, GZF bilgisinin algoritmaya dahil edilmesi ile şebekeden alınacak gücün mümkün olduğunca fiyatın ucuz olduğu zamanlarda temin edilmesi sağlanırken, şebekeye enerji satışının fiyatın pahalı olduğu zaman aralığında yapılması sağlanmaktadır. Böylece, tüketicinin elektrik faturasında maksimum kazanç amaçlanmaktadır. Evsel elektrikli cihazların enerji tüketimi tüketicinin alışkanlıklarına ve çevre şartlarına (sıcaklık, su basıncı, vb.) göre değişebilmektedir. Özellikle EEY kapsamındaki yük kontrolü tüketicinin konforunu en az seviyede etkileyecek şekilde yapılmalıdır. Bu sebeple literatürde evsel elektrikli cihazlar genel olarak ötelenebilir/ötelenemez veya kesintisiz/kesintili şeklinde gruplandırılmaktadır [1]. Bu çalışmada, tüketici konforu ön planda tutulduğundan öteleme yerine öncelikle geliştirilen akıllı transformator yapısı üzerinden gerilim azaltımı uygulanması yapılmaktadır. Eğer gerilim azaltımı ile güç tüketimi önceden tüketici tarafından belirlenen P_{limit} değerinin altına inmez ise kesintili yükler grubundaki klima (AC) veya elektrikli ısıtıcı (EI) cihazlarından aktif olanı ötelenmektedir. Yük tarafında ötelenebilir ve kesintili yüklerden olan klima ve elektrikli ısıtıcının çalışmalarının ötelenmesinde sırasıyla 3 koşul dikkate alınmıştır. İlk koşul olarak ilgili cihazların ötelenmesi için tüketici tarafından belirlenen P_{limit} değerinin aşılması gerekmektedir. Bu değer aşıldığında algoritma evdeki gerilim seviyesini azaltmaktadır. Eğer gerilim azaltımı ile güç tüketimi P_{limit} değerinin altına inmez ise ötelenecek cihaz için gerekli diğer koşullar sırasıyla dikkate alınmaktadır. Cihazların ötelenmesi için ikinci olarak bataryaların SOC değerine bakılmaktadır. Eğer SOC değeri %95'in altında ise ötelenme için ikinci koşul da sağlamış olmaktadır. Üçüncü koşul olarak ise iç ortam sıcaklığına bakılmaktadır. İç ortam sıcaklığı (T_i) tüketicinin klima ve elektrikli ısıtıcı için belirlediği alt veya üst sıcaklık limitlerinin arasında ise AC veya EI için kapatma komutu ilgili prize gönderilmektedir.



Şekil 9. Akıllı transformatör yapısının entegre edildiği EEY sisteminde kullanılan algoritmaya ait akış diyagramı
(The flowchart of the algorithm used in the smart transformer integrated HEM system)

İç sıcaklık limitlerinin daha iyi anlaşılması için örnek vermek gerekirse; kış mevsiminde EI kullanımında ötelenme için iç sıcaklık alt limiti tüketici tarafından 20°C 'ye ayarlandığından iç sıcaklık bu değer altında ($T_i < 20^{\circ}\text{C}$) ise EI için öteleme yapılmayacaktır. Böylece tüketicinin kullanımındaki cihazların çalışmasına yapılan müdahaleler minimum düzeyde tutularak, maksimum konfor sağlanması

hedeflenmiştir. Geliştirilen algoritmanın deneysel olarak test edildiği akıllı ev ortamının bir laboratuvar içerisinde bulunması sebebiyle T_i değerinin cihazların ötelenmesindeki etkisi gösterilememiştir. Geliştirilen EEY sistemi 5-dakikalık adımlarda yeni bir karar almaktadır. Başlangıçtaki ilk 5 dakika boyunca sistemden gelen veriler değerlendirilmekte ve sonraki 5-dakika boyunca uygulanacak



Şekil 10. Üretilen gerçek zamanlı fiyat tarifesi örneği (Sample of the generated real time pricing).

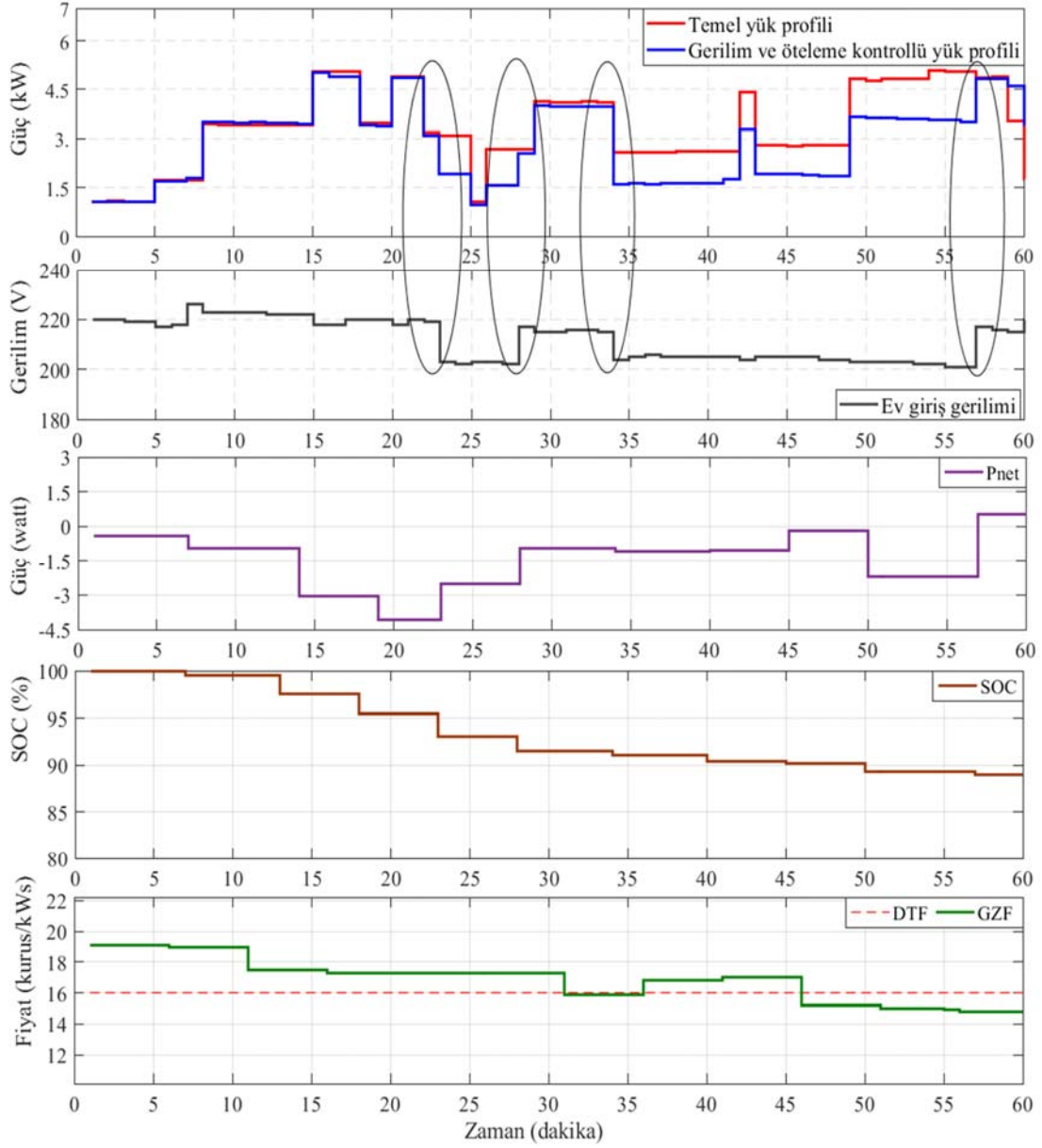
enerji yönetim kararı üretilmektedir. Her adım sonunda yeniden toplanan sistem verileri yeniden değerlendirilmektedir. AEL’de bulunan sistemler farklı haberleşme protokolleri kullandığından (İnveter devresi RS232 üzerinden haberleşirken, akıllı prizler ve akıllı transformatör ZigBee üzerinden haberleşmektedir) yazılan bir MATLAB programı üzerinden tüm haberleşme protokollerine uygun veri toplama yazılımı geliştirilmiştir. Bu nedenle verinin işlenip bir karar üretilmesi yaklaşık olarak 1 dakikalık bir zaman almaktadır. Sonuç olarak enerji yönetim kararları maksimum [5+1] dakikalık bir süreç içerisinde alınmaktadır. Şekil 9’da verilen akış diyagramına göre çalıştırılan EEY sisteminde elde edilen deneysel sonuçlar Şekil 11’de verilmiştir.

Şekil 11’de sırasıyla EEY sisteminin bulunmadığı ve EEY sisteminin bulunduğu durumlar için verilen evsel güç tüketim grafikleri ve ev giriş geriliminin değişimi verilmiştir. Şekil 11’de EEY sisteminde verilen kararların belirlenmesinde kullanılan parametrelerin değişimleri verilmiştir. Bu parametreler sırasıyla P_{net} , SOC ve dinamik fiyat değerleridir. Şekil 9’da verilen akış diyagramında bu parametrelerin nasıl kullanıldığına dair bilgi bulunmaktadır.

Şekil 11’de üstte EEY sisteminin bulunmadığı ve EEY sisteminin bulunduğu durumlar için verilen evsel güç tüketim grafikleri verilmiştir. Bu grafikler karşılaştırıldığında 10. ve 20. dakikalar arasında evdeki güç tüketiminin 3kW olan P_{limit} değerinin üzerine çıkmasına rağmen SOC>0,95 olduğundan tüketici konforu açısından gerilim azaltımı ve öteleme yapılmamıştır. Evsel güç tüketiminde normal profilden ilk farklılaşma 20. ve 25. dakikalar arasında oluşmuştur. Buradan algoritmadaki gerilim azaltımı için gerekli koşulların sağlandığı anlaşılmaktadır ($P_{yük} > 3$ kW, $0,3 < SOC < 0,95$, $P_{net} < 0$ ve $GZF > DTF$). Ev giriş gerilimi akıllı transformatör yapısı ile 200V’a düşürülmüştür. 25. ve 30. dakikalar arası incelendiğinde ise yük tüketimi P_{limit} değerinin altına indiğinden gerilim tekrar 220V yapılmıştır. 30. ve 35. dakikalar arasında da gerilim azaltımı için gerekli koşullar yeniden oluştuğundan ev giriş gerilimi tekrar 200V’a

düşürülmüştür. 35. ve 50. dakikalar arasında yük tüketimi 3kW’ın altında olmasına rağmen ev giriş geriliminin 220V’a yükseltilmesi haberleşme (veri toplama ve/veya komut gönderme) probleminden dolayı gerçekleştirilememiştir. Bu durum reel uygulamalarda karşılaşılabilecek problemleri göstermesi açısından önemlidir. 50. ve 55. dakikalar arasında gerilim azaltımı için gerekli koşullar yeniden oluştuğundan gerilim 200V’ta tutulmaya devam edilmiştir. 55. ve 60. dakikalar arasında ise güç tüketimi 3kW üzerinde olmasına karşın algoritma diğer koşulların uygunluğuna bağlı olarak gerilimi tekrar şebeke gerilimine yükseltmiştir. Bu aralıkta GZF değeri DTF değerinden düşük olduğundan daha ucuz enerji alımı mümkündür. Ayrıca, P_{net} değeri pozitifdir. Yani, yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen güç evde kullanılan güçten daha büyüktür. Batarya SOC değeri de belirlenen limitler arasında kalmaktadır. Bu nedenlerden dolayı gerilim azaltımına gerek kalmamıştır ve gerilim 220V’a çıkarılmıştır.

Ayrıca, Şekil 11’de verilen ev giriş gerilimi incelendiğinde gerilimde küçük dalgalanmalar görülmektedir. Bu dalgalanmalar temel olarak şebeke gerilimindeki anlık değişimler ve geliştirilen mekanik akıllı transformatör yapısı ile hassas kontrol yapılamamasından dolayı ortaya çıkmaktadır. Batarya SOC değerindeki değişim incelendiğinde bataryaların doluluk oranının uygun şekilde yönetildiği görülmektedir. GZF ve şebeke ile olan güç alış-veriş birlikte değerlendirildiğinde, algoritmanın güç akışını GZF’ye bağlı olarak yönettiği görülmektedir. Yapılan deneysel çalışma ile YEK’e sahip bir evde hem kaynak hem de yük tarafı birlikte ele alınarak daha kontrollü bir tüketim sağlanmış ve YEK’ten sağlanan enerji GZF dikkate alınarak şebekeye ve evdeki yüklerle aktarılmıştır. Geliştirilen akıllı transformatör yapısı kullanılarak öncelikli olarak gerilim azaltımı yapılarak ve ihtiyaç durumunda gerilim azaltımına ek olarak cihaz ötelemesi de yapılarak 5,1kW civarında olan pik güç değeri 3,5kW civarına düşürülmüştür. Buradan, pik gücün %30 oranında düşürülebildiği görülmektedir. Deneysel çalışmada sadece EI ötelenebilir yük olarak dikkate alınmıştır. Ancak, ötelenebilir yük sayısı artırılarak evsel güç tüketimi 3kW değerinin altına düşürülebilecektir.



Şekil 11. Deneysel sonuçlar (Experimental results)

6. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Akıllı şebekeler kavramı ile hayatımızda daha fazla yer almaya başlayan akıllı evlerde talep yönetimi uygulamaları giderek yaygınlaşmaktadır. Bu çalışmada, yenilenebilir enerji kaynaklarına sahip şebekeye bağlı bir akıllı ev için gerilim kontrol tabanlı yeni bir EEY sistemi için bir akıllı transformatör tasarımı ele alınmıştır. Geliştirilen akıllı transformatör yapısı ile ev giriş gerilimi EEY sisteminden gelen sinyale göre teknik standartlar sınırları içerisinde (-10%) kalacak şekilde kontrol edilerek evin anlık güç tüketimi dinamik olarak kontrol edilebilir hale getirilmiştir. Akıllı transformatör yapısı AEL'de deneysel olarak test edilmiş ve hem gerilim azaltımı hem de yük öteleminin

birlikte kullanımı ile ev pik güç talebinin yaklaşık %30 oranında düşürülebildiği görülmüştür. Ev pik güç talebinin düşürülmesi için öncelikle gerilim azaltımının kullanımı ile literatürde yaygın olarak kullanılan yük öteleme veya yük atma gibi yöntemler ile cihazların çalışmasına doğrudan müdahale edilmesi en aza indirilmekte ve tüketici konforu maksimize edilmektedir. Ancak, gerilim azaltımı yöntemi özellikle ısıtma işlemi yapan cihazlar için çalışma sürelerinin uzamasına neden olmaktadır. Çalışmanın başlangıcında ev giriş geriliminin istenilen değerlerde kalmasını sağlamak amacı ile kapalı çevrim kontrol kullanılmıştır. Ancak, kullanılan oto transformatör yapısındaki kayar uç hassas kontrole imkan vermediğinden ve şebeke geriliminde oluşan dalgalanmalardan dolayı kontrol devresi sürekli gerilimi

istenilen değere getirmeye çalışmıştır. Bu yüzden kararlı bir çalışma elde edilememiştir. Bunun sonucunda açık çevrim çalışmaya geçilmiştir. Böylece, önerilen gerilim kontrolünün uygulanabilirliği deneysel olarak gösterilebilmiştir. Ev giriş gerilimindeki dalgalanmaların önlenmesi için bu çalışmada ele alınan mekanik akıllı transformatör yapısı yerine elektronik akıllı transformatör yapısının kullanılması bir çözüm olacaktır. Bu konu yazarların gelecekteki çalışma hedefi olarak belirlenmiştir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma, Üniversite Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından ve İstanbul Kalkınma Ajansı tarafından desteklenmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Hong S.H., Yu M., Huang X., A real-time demand response algorithm for heterogeneous devices in buildings and homes. *Energy*, 80, 123–32, 2015.
- Laicane I., Blumberga D., Blumberga A., Rosa M., Reducing Household Electricity Consumption through Demand Side Management: The Role of Home Appliance Scheduling and Peak Load Reduction, *Energy Procedia*, 72, 222–229, 2015.
- Zhou S., Wu Z., Li J., Zhang X., Real-time Energy Control Approach for Smart Home Energy Management System, *Electric Power Components Systems*, 42, 315–326, 2014.
- Yumurtacı Z., Dönmez A.H., Konutlarda enerji verimliliği, *Mühendis ve Makine*, 54, 38–43, 2013.
- Electricity end use in USA 2016. <http://www.eia.gov/totalenergy/data/annual/index.cfm>, Erişim tarihi Mart 20, 2016.
- Gottwalt S., Ketter W., Block C., Collins J., Weinhardt C., Demand side management—A simulation of household behavior under variable prices, *Energy Policy*, 39, 8163-8174, 2011.
- Finn P., O’Connell M., Fitzpatrick C., Demand side management of a domestic dishwasher: Wind energy gains, financial savings and peak-time load reduction, *Applied Energy*, 101, 678-685, 2013.
- Rastegar M., Fotuhi-Firuzabad M., Aminifar F., Load commitment in a smart home, *Applied Energy*, 96, 45–54, 2012.
- Bokhari A., Alkan A., Dogan R., Diaz-Aguilo M., De Leon F., Czarkowski D., Experimental determination of the ZIP coefficients for modern residential, commercial, and industrial loads, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 29, 1372-1381, 2014.
- Preiss R.F., Warnock V.J., Impact of voltage reduction on energy and demand, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-97, 1665–1671, 1978.
- Kennedy B.W., Fletcher R.H., Conservation voltage reduction (CVR) at Snohomish County PUD, *IEEE Transactions on Power Systems*, 6, 986–998, 1991.
- Ellens W., Berry A., West S., A quantification of the energy savings by Conservation Voltage Reduction, *IEEE International Conference on Power System Technology*, 1-6, 30 Ekim-2 Kasım 2012.
- Schneider K.P., Fuller J.C., Tuffner F.K., Singh R., Evaluation of Conservation Voltage Reduction (CVR) on a National Level, Technical Report, Pacific Northwest National Laboratory, 2010.
- Wang Z., Wang J., Review on implementation and assessment of conservation voltage reduction, *IEEE Transactions on Power Systems*, 29, 1306-1315, 2014.
- Elma O., Selamoğulları U.S., A new home energy management algorithm with voltage control in a smart home environment, *Energy*, 91, 720-731, 2015.
- Santoro P., Calderaro V., Galdi V., Piccolo A., Active smart socket design to perform local control of power demand in residential units, *8th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives*, 1-5, 19-21 Nisan 2016.
- Elma, O., Selamoğulları U.S., A Home Energy Management Algorithm with Smart Plug for Maximized Customer Comfort, *4th International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems*, 1-4, 24-26 Kasım 2015.
- Microplanet. What is CVR?. <http://www.microplanet.com/resources/what-is-cvr>, Erişim tarihi Mart 01, 2017.
- EPDK. Elektrik Dağıtım ve Perakende Satışına İlişkin Hizmet Kalitesi Yönetmeliği. <http://www.epdk.org.tr/TR/DokumanDetay/Elektrik/Mevzuat/Yonetmelikler/ElektrikDagitimiPerakendeSatisinaHizmetKalitesi>, Erişim tarihi Nisan 15, 2016.
- İnce A.T., Elma O., Selamoğulları U.S., Vural B., Data Reliability and Latency Test for ZigBee-based Smart Home Energy Management Systems, *7th International Ege Energy Symposium an Exhibition, Usak, Turkey*, 1-8, Haziran 18-20, 2014.
- Gungor V.C., Sahin D., Kocak T., Ergut S., Buccella C., Cecati C., A Survey on smart grid potential applications and communication requirements, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 9, 28-42, 2013.
- Elma O., Akıllı şebekeler için yeni bir ev enerji yönetim algoritmasının geliştirilmesi ve uygulanması, Doktora tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2016.
- Elma O., Selamoğulları U.S., A comparative sizing analysis of a renewable energy supplied stand-alone house considering both demand side and source side dynamics, *Applied Energy*, 96, 400-408, 2012.
- Victron Energy. Gel and AGM Batteries. <http://www.victronenergy.com/>, Erişim tarihi Mart 01 2017.
- Enerji Enstitüsü. Aküler hakkında bilmeniz gerekenler. <http://enerjienstitusu.com/2013/04/22/akuler-hakkinda-bilmeniz-gerekenler/>, Erişim tarihi Mart 01, 2017.