

Bir Konutta Fotovoltaik Sistem ve Yük Takipli Enerji Depolama Sistemi Uygulamasının Yük Profiline ve Enerji Tüketim Bedeline Etkisi

Effects of the Residential Photovoltaic Systems and Load Following Energy Storage Systems Applications to The Load Profile and Cost of Energy Consumption

Ahmet Doğan¹, Mustafa Alcı²

^{1,2}Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü

Erciyes Üniversitesi

¹ahmetdogan@erciyes.edu.tr, ²malci@erciyes.edu.tr

Özet

Fotovoltaik sistemler günümüzde en yaygın kullanılan yenilenebilir enerji kaynakları çeşitlerinden biridir. Teknolojinin gelişmesi ile birlikte daha ekonomik hale gelmesi bu sistemlerin yaygınlaşmasını sağlamaktadır. Fotovoltaik sistemler güneş enerjisi santralleri olarak orta ve yüksek gerilim seviyesine bağlanabilirken günümüzde alçak gerilim seviyesinde bağlantısı gerçekleştirilebilmektedir. Şebekeye bağlantı zorlukları gibi çeşitli dezavantajlarına rağmen şebekedeki baskının azalması ve puant yüklerin düşürülmesi açısından kullanıcının elektriğini üretmesi teşvik edilmektedir. Bu nedenle hükümetler tarafından üretilen fazla elektriğin satın alınması gibi teşvik politikaları uygulanmaktadır. Bu çalışmada elektrikli cihazların fiziksel modelleri kullanılarak bir konutun elektrik tüketim profilinin benzetimi yapılmıştır. Konuta, Enerji Depolama Sistemi (EDS) ve fotovoltaik sistemler kurularak EDS'nin yük takip metodu ile dolması ve boşalması sağlanmıştır. Benzetim 2015 yılının tamamı için gerçekleştirilmiş olup şebeke ve kullanıcı açısından teknik ve ekonomik faydaları gösterilmeye çalışılmıştır.

Abstract

Photovoltaic systems are one of the most widely used renewable energy source today. Technologic developments provide them to be more economic and widespread. Photovoltaic systems are connected the distribution systems as solar power plants whereas they can be connected at low voltage level. Although there are various disadvantages such as grid connection challenges, the users are encouraged to produce own electricity to decrease the tension of the grid and peak loads. Therefore, governments guarantee to purchase produced extra electricity as incentive policies. In this study, load profile of a house is carried out using physical model of the electrical home devices. Photovoltaic system and Energy Storage Systems (ESS) are connected to house and ESS charged/discharged with load following method. Simulation is run for the whole the year of 2015. Technical and economic benefits of residential photovoltaic with ESS are presented.

1. Giriş

Fosil yakıt kaynaklarının gün geçtikçe azalıyor olması ve temiz enerji ihtiyacı insanoğlunu yeni ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları (YEK)'e yönlennesini gerekli kılmıştır. Bu kaynakların kullanımı önceden çok kısıtlı iken gelişen teknolojiyle doğru orantılı bir şekilde maliyetlerin azalması bu kaynakların enerji üretimindeki payını artırmıştır. Dünyanın gelişmekte olan ülkeleri YEK teknolojisinin hem gelişebilmesi hem de kullanılabilmesi için stratejiler belirlemektedir. ABD'de enerji üretiminin 13,7%'si yenilenebilir enerjiden sağlanırken, bu oran AB ülkeleri için 16%'dır [1, 2]. AB, 2030 yılı itibarı ile enerji ihtiyacının 27%'sini yenilenebilir enerji ile karşılama hedefini koyarken, bu oran ABD için 32%'dir. Almanya 2050 yılına kadar enerji üretiminin tamamını yenilenebilir enerjiden karşılamayı hedef olarak belirlemiştir [3, 4].

Rüzgâr, güneş, hidrolik, jeotermal, biyokütle başlıca yenilenebilir enerji kaynaklarıdır. Güneş enerjisi, konutların çatılarına monte edilebilir olması ve fotovoltaik panellerinin geçmişe göre nispeten daha ucuza mal edilmesiyle perakende tüketiciler tarafından kullanımı oldukça artmıştır. Güneş enerjisinin, kaynağın sonsuz olması, çevreye olumsuz etkisinin olmaması ve işletiminin ekonomik olması gibi avantajlarının yanı sıra üretilen enerjinin hava şartlarına bağlı olması, verimin düşük olması, şebekeye bağlantı problemleri dezavantajları olarak sıralanabilir.

Fotovoltaik sistemlerden enerji üreten bazı ülkeler ve kurulu kapasiteleri aşağıda verilmiştir [5]:

1. Çin (43.5 GW)
2. Almanya (39.7 GW)
3. Japonya (34.4 GW)
4. ABD (25.5 GW)

Güneş enerjisinden üretilen elektrik güneş ışığına göre değiştiği için üretilen enerjinin ya o anda kullanılması ya da depolanması gerekmektedir. Enerji Depolama Sistemleri (EDS) gündüz üretilen elektriği depolarken akşamları da depolanan bu enerji puant saatlerde kullanılarak, puant yük

miktarı düşürülmektedir. Dolayısıyla elektrik fatura bedelleri de düşmektedir. Ayrıca EDS dolu olduğunda üretilen enerjinin fazlası şebekeye satılarak tüketici gelir elde edebilmektedir.

Bu çalışmada elektrikli cihazların fiziksel modelleri kullanılarak bir konutun elektrik yük profili oluşturulmuştur. Bu konuta fotovoltaik güneş pilleri ve EDS kurulmuş, EDS yük takip yöntemi ile dolup/boşalmıştır. Böylece konutun, dolayısıyla sistemin yük yoğunluğu düşürülmüştür. Bunun sonucunda tüketicinin elektrik fatura bedellerinde çok önemli bir azalma görülmüştür. 2. Bölümde konutun elektrikli cihazların fiziksel modelleri kullanılarak yük profilinin oluşumu açıklanmıştır. 3. Bölümde fotovoltaik sistemin matematiksel modeli verilmiş olup 4. Bölümde de EDS'nin yük takibi yöntemi ile dolması/boşalması açıklanmıştır. 5. Bölümde örnek çalışma gerçekleştirilirken 6. Bölümde sonuç ve yorumlar verilmiştir.

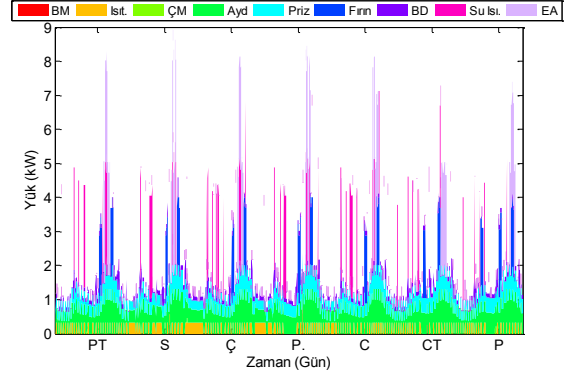
2. Konut Yük Profiline Oluşturulması

Konut yük profilinin gerçekçi bir şekilde oluşturulabilmesi için elektrikli cihazların fiziksel modellerinin benzetiminin yapılması önemli bir husustur. Bu çalışmada konut yük profili GridLAB-D ve Matlab kullanılarak oluşturulmuştur. GridLAB-D her bir ev cihazının modellenmesine imkân vererek bir konut için gerçekçi bir yük profilinin oluşmasını sağlamaktadır [6, 7].

Konut içi sıcaklığı, duvar ve çatı yalıtım değeri, dış sıcaklık ile beraber eşya ve insanlardan kaynaklı sıcaklık kazancına bağlı olarak değişmektedir. Konutun içinde modellenmiş elektrikli cihazlar; ısıtma-soğutma sistemleri, su ısıtıcısı, aydınlatma, prizler, buzdolabı, çamaşır makinesi, bulaşık makinesi, fırın ve elektrikli otomobildir.

Her bir elektrikli cihazın tükettiği enerji, kapasitesine ve kullanım sıklığına göre değişmektedir. Bulaşık makinesi ve çamaşır makinesinin çalışması kullanıma olasılık değerine bağlıdır. Her bir cihazın bir zaman dilimi için çalışma olasılık değeri yazılımın içinde liste olarak verilmiştir. Her zaman dilimi için belirlenmiş olasılık değerleri benzetim devam ederken üst üste toplanmakta ve olasılık değeri toplamı 1'e ulaştığında cihaz çalışma durumuna geçmektedir [8]. Çalışma olasılığı, yani kullanım sıklığına bağlı olarak her bir cihazın çalışma sıklığı da değişmektedir. Su ısıtıcısı su tüketiminin miktarına göre çalışmaktadır ve depodaki suyun sıcaklığını belli bir set değerinde tutmaya çalışmaktadır. Elektrikli otomobil işten eve geldikten sonra 3 kW ile dolmaya başlamaktadır ve 16 kWh'lik bataryası tamamen yüklenene kadar dolmaktadır.

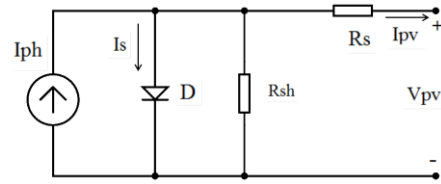
Bir konutun 5-12 Ocak 2015 tarihleri arasında bir haftalık elektrik tüketim profili Şekil-1'de verilmiştir. 5 kişinin yaşadığı farz edilen ve 220 m²'lik yüz ölçümüne sahip bir konutun ısıtma set değeri 20°C iken soğutma set değeri ise 23°C olarak belirlenmiştir. Su sıcaklığının set değeri ise 50°C'dir. Çalışmada ABD'nin kuzey batısında bulunan Washington eyaletine bağlı Yakima şehrinin gerçek sıcaklık verileri kullanılmış olup benzetim 2015 yılının tamamı için gerçekleştirilmiştir. Bütün elektrikli cihazların çektiği güç ayrı ayrı gösterilirken, puan saatlerde konutun toplam yükü 8 kW'ın üstündedir.



Şekil 1: Konutun bir haftalık yük profili

3. Fotovoltaik Sistemler

Fotovoltaik güneş hücreleri güneş panellerinin temel yapılarıdır. İstenilen gücü elde etmek için seri ya da paralel olarak bağlanırlar. Fotovoltaik bir hücre ışığa maruz kaldığında akım üreten p-n jonksiyonlu bir yarı iletkenidir. Fotovoltaik hücrenin matematiksel modeli farklı şartlardaki akım, gerilim ve güç davranışını gözlemlemek için gereklidir. Bir Fotovoltaik hücrenin eşdeğeri Şekil-2'de gösterilmiştir. Hücrenin seri direnci (R_s), eksponensiyel diyot (D) ve şönt direncin (R_{sh}) paralel yapısına seri bağlıdır. (I_{ph}) ve (V_{pv}) fotovoltaik hücrenin sırasıyla akımını ve gerilimini vermektedir [9].



Şekil 2: Fotovoltaik hücre eşdeğer devresi

Fotovoltaik hücrenin çıkış akımı;

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left(e^{q(V_{pv} + I_{pv} R_s) / (nKT)} - 1 \right) - (V_{pv} + I_{pv} R_s) / R_{sh}$$

I_{ph} : Güneş hücresi akımı

I_s : Diyot doyum akımı

q : Elektron dolma değeri (1.6×10^{-19} C)

n : İdeallik faktörü

K : Boltzman sabiti (1.38×10^{-23} J/K)

T : Sıcaklık °K

Fotovoltaik hücrede güneşin indüklediği akım değeri, solar ışıma seviyesi ve çalışma sıcaklığına bağlı olarak değişir.

$$I_{ph} = I_{sc} + K_i (T_c - T_r) \frac{I_r}{1000}$$

I_{sc} : Kısa devre akımı

K_i : Kısa devre akımının sıcaklık katsayısına oranı (A/K)

I_r : Hücre yüzeyinin ışıma miktarı (W/m²)

T_c, T_r : Hücre çalışma ve referans sıcaklığı

Bu çalışmada General Enerji tarafından üretilen GEPVp-200-M modülü kullanılmış ve 1000 W/m² ışıma için katalog değerleri aşağıda verilmiştir [10].

Çizelge 1: GEPVp-200-M modülü özellikleri

Pik güç (Wp)	Watt	200
Maksimum güç gerilimi (Vmp)	Volt	26.3
Maksimum güç akımı (Imp)	Amper	7.6
Açık devre gerilimi (Voc)	Volt	32.9
Açık devre akımı (Isc)	Amper	8.1
Açık devre sıcaklık katsayısı	mA/C	5.6
Açık devre gerilim katsayısı	V/C	-0.12
Mak. Güç sıcaklık katsayısı	%/C	-0.5
Normal işletme sıcaklığı	C	50

4. Yük Takip Metodu ile EDS'nin Dolması/Boşalması

Yük takibi arz ile talep arasındaki dengeyi kurmak için özellikle dağıtım şebekelerde kullanılan yardımcı bir servistir. Bu çalışmada yük takip metodu ile fotovoltaik sisteme bağlı EDS'nin dolma ve boşalma durumuna karar verilmektedir. Kullanıcı, EDS'nin yük takibi ile dolması/boşalması için bazı değerleri belirlemelidir. Bu değerler;

$P_{dbaş}$: Dolma başlangıç güç değeri

P_{dbit} : Dolma bitiş güç değeri

$P_{bbaş}$: Boşalma başlangıç güç değeri

P_{bbit} : Boşalma bitiş güç değeri

Bu metotta dolma/boşalma işlemine kullanıcının belirlemiş olduğu referans güç değerlerine göre karar verilmektedir. Aşağıda yük takip metodu ile dolma/boşalma işlemi özetlenmektedir.

- Eğer $P_{yük} < P_{dbaş}$ dolma işlemine başla
- Eğer $P_{yük} > P_{dbit}$ dolma işlemi bitir
- Eğer $P_{yük} > P_{bbaş}$ boşalma işlemine başla
- Eğer $P_{yük} < P_{bbit}$ boşalma işlemi bitir

Eğer konutun yük değeri $P_{dbaş}$ 'dan az ise EDS'ler dolmaya başlar. Eğer konutun yük değeri P_{dbit} 'den yüksek bir seviyeye ulaşırsa dolma işlemi son bulur ve EDS'ler bekleme moduna geçer. Aynı algoritma boşalma için de geçerlidir. Eğer konutun yük değeri $P_{bbaş}$ 'un üstünde ise EDS'ler boşalmaya başlarlar. Konutun yük değeri P_{bbit} değerinin altında ise boşalma işlemi sonlanır. EDS sabit gerilim ve değişken akım ile dolmaktadır. EDS dolma ve boşalma güçleri yine kullanıcının belirlemiş olduğu dolma/boşalma başlangıç/bitiş değerleri göz önünde bulundurularak hesaplanır. EDS dolma/boşalma güç değerleri aşağıdaki eşitlikler ile hesaplanır.

$$P_d = P_{dbit} - P_{yük} \quad 0 < P_d < P_{dmak} \quad (2)$$

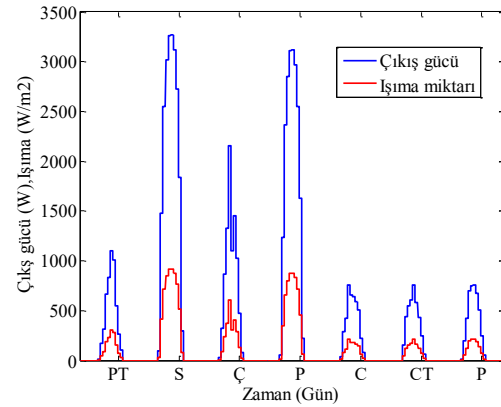
$$P_b = P_{yük} - P_{bbit} \quad 0 < P_b < P_{bmak} \quad (3)$$

Dolam işleminin sonlanmaması için dolma güç değeri konutun yüküne eklendiğinde toplam yük $P_{dbaş}$ değerinin geçmemektedir. Boşalma güç değeri de konutun yükünden çıkarıldığında P_{bbit} değerinin altına düşmemektedir ve boşalma işlemi devam etmektedir.

5. Örnek Çalışma

Bölüm 2'de ev cihazları modellenerek yük profili verilen konuta monte edilen 20 adet GEPVp-200-M modülünden oluşan bir fotovoltaik sistemin benzetimi yapılmıştır. Tesla'nın 8 kWh kapasiteli, 2 kW'lık dolma ve boşalma güç değerine sahip modeli EDS olarak seçilmiştir. $P_{dbaş}$ 3 kW seçilirken P_{dbit} , $P_{bbaş}$ ve P_{bbit} değerleri 4 kW olarak seçilmiştir.

Yakıma şehrinin gerçek hava değerleri kullanılarak yapılan benzetim sonucunda fotovoltaik güç çıkış grafiği Şekil-3'de verilmiştir. Salı ve Perşembe günleri fotovoltaik sistemden 3,270 kW'a kadar çıkış gücü elde edilebilmiştir. Diğer günlerde güneş ışığıyla orantılı olarak çıkış güçleri nispeten daha azdır.



Şekil 3: Benzetimi yapılan fotovoltaik sistemin ışıma değerleri ve çıkış gücü

Fotovoltaik sistemden üretilen enerji EDS'nin dolmasında ve konutun elektrik ihtiyacının karşılanmasında kullanılırken üretilen fazla elektrik şebekeye satılarak gelir elde edilebilmektedir. Çalışmada göz önünde bulundurulanan kullanım saatine göre fiyatlandırma değerleri aşağıdaki Çizelge-2'de verilmiştir. Fiyatlandırma puant zaman, gündüz ve gece fiyatları olarak yapılmaktadır. 17-22 arası puant saatler, 22-06 gece saatleri ve 06-17 gün saatleri olarak belirlenmiştir.

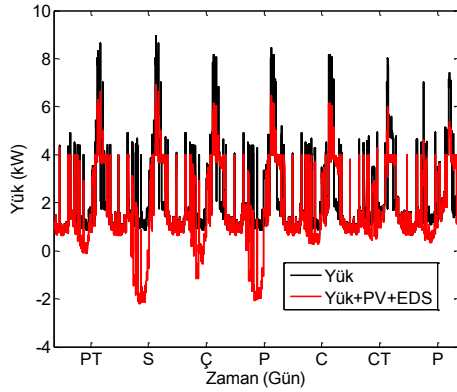
Çizelge 2: Konutlar için hesaplamada kullanılan perakende elektrik fiyatları

	Gündüz	Puant	Gece
Elektrik fiyat (kWh/\$)	0.4211	0.6320	0.2689

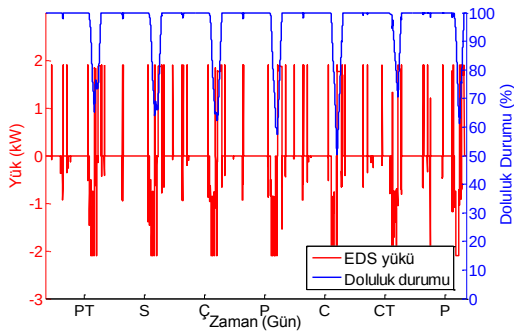
Şekil-4'de konutun normal yük profili ile birlikte EDS ve fotovoltaik sistemden eklendikten sonraki yük profili karşılaştırılmıştır. Verilen haftada puant yük değeri Salı 18.24'de 8,95 kW iken EDS ve fotovoltaik eklendikten sonra bu değer 6,95 kW'a düşmüştür. Yük faktörü (puant yük/ort. yük) değeri 0.23'den 0.245'e yükselmiştir.

Şekil-5'de EDS'nin dolma/boşalma grafiği verilmiştir. Mavi renkli çizgi EDS dolma durumunu gösterirken kırmızı renkli çizgi ise EDS yük durumunu göstermektedir. Yük durumunun negatif olduğu durumlarda EDS dolarken pozitif olduğu durumlarda EDS dolmaktadır. EDS'nin genelde puant saatin olduğu akşam saatlerinde boşaldığı görülmektedir. Şekilde görüldüğü üzere EDS dolma/boşalma limit değerlerin göre değişik güçlerde dolma/boşalma olabilmektedir. EDS'nin

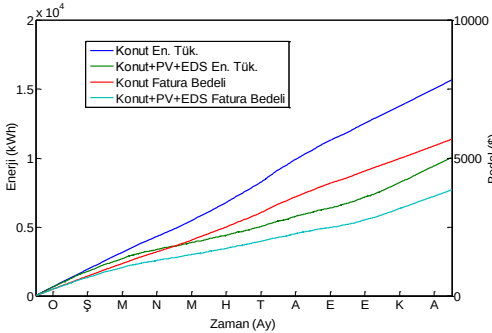
doluluk oranı cuma günü akşam saatlerinde 52%'ye kadar düşmüştür.



Şekil 4: Konutun Fotovoltaik ve EDS'den önce ve sonra yük profili



Şekil 5: EDS yük ve doluluk durumu



Şekil 6: Konutun Fotovoltaik ve EDS'den önce ve sonra şebekeden enerji talep miktarı ve tüketim bedelleri

Şekil-6'da şebekeden çekilen yıllık enerji ve bu enerjinin bedelinin gösteren grafik verilmiştir. Fotovoltaik sistem kullanılmadan bu konutun şebekeden çektiği yıllık toplam enerji 15,682 kWh iken fotovoltaik sistemin kullanılması ile bu değer 10,060 kWh'e düşmüştür. Çizelge-2'de verilen kullanım zamanına göre uygulanan fiyatlandırma ile enerjiye ödenen bedel ise 5,687.6 \$'dan 3,850.9'e \$'a düşmüştür. Enerjiye ödenen yıllık bedelde 32.3% bir azalma gerçekleşmiştir. Fotovoltaik güneş sisteminin konutlara kurulum maliyeti yaklaşık 3.5 \$/W'dır [11]. 4 kW'lık bu sistemin kurulum maliyeti 14,000\$ olarak hesaplanır ve harcanan bedelin geri dönüşü 7-8 yıllık bir süreçte gerçekleşir. Fotovoltaik sistemlerin 25-40 yıllık ömrü olduğu düşünülürse

uzun vadede konut sahibi için getirisi olmakla beraber puant yüklerin düşürülmesinde etkili bir uygulamadır.

6. Sonuç

Fotovoltaik sistemler, Enerji Depolama Sistemleri ile birlikte düşük gerilim seviyesinde de oldukça yaygın hale gelmektedir. Bu sistemler elektrik cihazlarının fiziksel modelleri kullanılarak yük profili oluşturulan bir konuta uygulanmış olup güç tüketim profilinde değişiklikler gözlenmiş ve kullanıcı açısından ekonomik getirileri değerlendirilmiştir. Gün içinde güneş ışığından ürettiği elektrik öncelikle iç tüketim ve EDS dolması için kullanılırken fazlası şebekeye satılmaktadır. Yük takip metodu ile dolması ve boşalması sağlanan EDS kullanıcının belirlediği yük değerinin altında dolarken yine kullanıcının belirlediği yük değerinin üstünde boşalmaktadır. Böylelikle puant yükte azalma sağlanırken yük faktörü artmaktadır. Kullanıcı puant saatlerde enerji tüketimini azaltması ve gün içindeki fazla enerjiyi şebekeye satması ekonomik olarak önemli bir fayda sağlamaktadır. Konuta kurulacak bir sisteme harcanan bedelin geri dönüşü de sistemin ömrü dikkate alındığında makul sayılabilecek bir zaman diliminde gerçekleşmektedir.

7. Kaynaklar

- [1] Eurostat, Renewable Energy Statistics, 2016
- [2] US Department of Energy, 2013 Renewable Energy Databook, 2014.
- [3] International Renewable Energy Agency, A Renewable Energy Roadmap, 2015.
- [4] European Energy Commission, 2030 Energy Strategy, 2016
- [5] IEA International Energy Agency, Snapshot of Global Photovoltaic Market, 2015.
- [6] Chassini, D. P., Schneider, K., Gerkensmeyer, C., Gridlab-d: an open-source power systems. transm. distrib. Conf. Expo., Chicago, USA, 21-24 April 2008, 1-5
- [7] Schneider, K., Fuller, J. C., Chassin, D. P., Multi-state load models for distribution system analysis, IEEE Trans. Power Syst. 26 (4): 2425-2433, 2011.
- [8] Dogan, A., Kuzlu, M., Pipattanasomporn, M., Rahman, S., Yalcinoz, T., Impact of ev charging strategies on peak demand reduction and load factor improvement. 9th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO), Bursa, TR, 26-28 Nov., 374-378, 2015.
- [9] Ibrahim, O., Yahaya, N. Z., Matlab/Simulink Model of Solar PV Array with Perturb and Observe MPPT for Maximising PV Array Efficiency, IEEE Conference on Energy Conversion, 19-20 Oct. 2015.
- [10] GEPVp-200-M, 200 Watt Photovoltaic Module For 600 Volt Applications Datasheet
- [11] Donald, C., Carolyn, D., Ran, F., Kristen A., and Robert, M., U.S. Photovoltaic Prices and Cost Breakdowns: Q1 2015 Benchmarks for Residential, Commercial, and Utility-Scale Systems, National Renewable Energy Laboratory, NREL/TP-6A20-64746, 2015