

Fotovoltaik Panellerin Senkron Jeneratör ile Kullanımı

Canan Aladağ

Ahmet Orhan

cananaladag@osmaniye.edu.tr aorhan@firat.edu.tr

Doğada bulunan enerji kaynaklarının hızla tükenmesi ve petrol, kömür vb. gibi kendini yenileme durumu olmayan enerji kaynaklarının çevreye verdiği zararlardan dolayı, yenilenebilir enerji kaynakları kullanımı kaçınılmaz bir hal almaktadır. Güneş enerjisi, günümüzde birçok alanda enerji sistemleri ile birlikte kullanılmaktadır. Bu sistemlerde genelde, fiyat/verim oranının olabildiğince düşük tutulmasına çalışılır. Bu çalışmada, enerji sürekliliğinin önemli olduğu sistemlerde, klasik inverterli sistemlerin alternatifi olabilecek fotovoltaik enerji tabanlı bir güç enerjisi üretim santralının tasarımı ve modellenmesi yapılmıştır. Bir yıllık üretim performansı çıkarılmış olan 1MW'lık klasik inverterli bir fotovoltaik santralde, şebeke tarafının enerjisiz kalma durumunda lokal olarak yükleri besleyebilecek bir sistem önerilmiştir. Bu amaçla; fotovoltaik panelden elde edilen gerilim ile bir DA motoru sürülmüş ve bu DA motorla senkron jeneratör tahrik edilerek sistem sürekliliği sağlanmıştır. Tasarlanan sistem farklı yük profilleri altında incelenerek elde edilen sonuçların güvenilirliği ispatlanmıştır.

Günümüzde artan enerji talebi ve fosil yakıtların çevreye verdiği olumsuz etkiler nedeniyle yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim artmıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan güneş enerjisi, temiz, ucuz ve doğada kolayca ulaşılabilen bir enerji kaynağı olduğundan günümüzde yaygın bir şekilde tercih edilmektedir. Güneş enerjisi; su pompalama ve depolama, soğutma, havalandırma, aydınlatma ve uydu sistemleri gibi elektrik enerjisine gereksinim duyulan birçok alanda kullanılmaktadır. Güneş panelleri ve bu panelleri içeren fotovoltaik (FV) sistemler güneş enerjisinden doğrudan veya dolaylı olarak yararlanılmasını sağlarlar. Güneş panelleri ile yapılan çalışmaların çoğunda güneş panellerinin verimini etkileyen ana unsurların ortam ve panel sıcaklığı, güneş ışınım şiddeti ve rüzgar hızı gibi faktörler olduğu görülmektedir [1-4]. Ref. [5]'te güneş enerjisi destekli fırçasız doğru akım motoruna bağlı bir pompa sistemi tasarlanmıştır. Sistemde yükseltici tip doÄnnüştürücü kullanılarak güneş panellerinden alınan gerilim elektrik motorunu tahrik edebilecek seviyeye çıkarılmıştır. Ayrıca maksimum güç kontrolü takip sistemi sayesinde sistemin verimi artırılmıştır [5]. Ayrıca fotovoltaik beslemeli tek ve üç fazlı asenkron motorların kontrol sistemleri üzerine yapılan çalışmada [6]; motor hızının güneşlenme seviyesinden etkilenmediği görülmüştür. Üç fazlı asenkron motorun güneş panelleri ile beslenmesine dayanan çalışmada [7], panellerden elde edilen doğru gerilim üç fazlı inverter devresi ile alternative gerilime dönüştürülmüş ve asenkron motora uygulanmıştır. Asenkron motorun hız kontrolü vektör kontrol tekniği ile gerçekleştirilmiş ve sistemin davranışı detaylı olarak incelenmiştir [7]. Ref. [8]'de güneş enerjisi uyarmalı senkron jeneratör ile enerji üreten küçük bir hidroelektrik santral sistemi tasarlanmıştır. Tasarlanan santralin kullanılabilir ve kaliteli bir enerji üretebilmesi için uyartım akımı

ve sistemdeki mekanik enerji birbirinden bağımsız iki adet kontrolör ile kontrol edilmiştir.

Şebeke ile bağlantılı (aküsüz) fotovoltaik sistemlerde, şebekede oluşabilecek herhangi bir kesinti durumunda, güneş panelleri gün ışığı olduğu sürece sisteme enerji vermeye devam edecek ancak şebeke tarafı enerjisiz hatlarla (sea sarılı bir ada (island) gibi davranacaktır. Bu duruma "adalanma (islanding)" denilir. Adalanma; hat boyu çalışan kişilerde güvenlik problemlerine, hatta bağlı inverterlerin zarar görmesine ve gerilim dalgalanmalarına sebep olmaktadır. Bu yüzden şebeke ile bağlantılı inverter tabanlı (aküsüz) fotovoltaik sistemlerde, şebekede oluşabilecek herhangi bir kesinti durumunda inverterlerin kendini kapatması gerektirir (anti-islanding). Ancak arıza giderilene kadar son kullanıcı (tüketici) enerjisiz kalacaktır. Bu çalışmada sistemin "adalanma"dan dolayı enerjisiz kalması durumunda tüketicinin enerjisiz kalmaması için alternatif bir enerji üretim sistemi geliştirilmiştir.

Çalışmada fotovoltaik panellerden elde edilen gerilim iki bacaklı yükseltici tip bir konvertörle yükseltılarak DA motoru sürülmüş ve bu DA motoru ile senkron jeneratör tahrik edilmiştir. Senkron jeneratördeki rotor uyartımı ise ayrı bir DA kaynak tarafından sağlanmıştır. Bu enerji sistemi MATLAB/Simulink ortamında modellenmiş ve sistemin farklı yük profilleri altında çalışmasını sağlayacak uygun kontrolörler tasarlanmıştır.

2. Güneş Hücresi ve Modülünün Modellenmesi

Yarı iletken malzemelerin ince bir katman olarak birleştirilmesiyle güneş hücreleri elde edilir. Fotovoltaik hücrenin I-V karakteristiği karanlık bir ortamda bulunan diyot karakteristiği ile benzerdir. Güneş ışığı etkisinde kalan fotonlar sayesinde elektron hareketi ile akım akmaya başlar. Şekil 1' de güneş pilinin basitleştirilmiş tek diyotlu eşdeğer devresi

gösterilmektedir. Basit diyot modelinden, diyot akımı denklem (1)'deki gibi ifade edilebilir.

$$I_d = I_s \left[e^{\left(\frac{qV_0}{akT^C} \right)} - 1 \right] \quad (1)$$

Burada q elektrik şarjı (C) (1.602 x 10⁻¹⁹), TC p-n jonksiyonun sıcaklığını (K), V0 ise güneş hücresinin çıkış gerilimini göstermektedir. Şekil 1'e göre çıkış akımı panel akımı ile diyot akımı arasındaki farka eşittir.

$$I_0 = I_{PV} - I_d \quad (2)$$

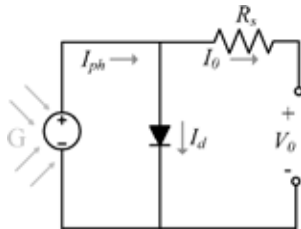
Denklem (1), denklem (2)'de yerine konulup tekrar düzenlenirse çıkış akımı;

$$I_0 = I_{PV} - I_s \left[e^{\left(\frac{V_0}{aV_T} \right)} - 1 \right] \quad (3)$$

olarak hesaplanır. Pratikte modelleme yaparken bazı parametrelerinde göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

Kullanılan malzemelerin ve temas yüzeyinin dirençlerinin toplamı güneş hücresi modelinde seri direnç (RS) olarak temsil edilmektedir (Bakınız Şekil 1). Seri direncin eklenmesiyle birlikte denklem (3) aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$I_0 = I_{PV} - I_s \left[e^{\left(\frac{V_0 + I_0 R_s}{aV_T} \right)} - 1 \right] \quad (4)$$



Şekil 1: Tek diyotlu güneş pili eşdeğer devresi

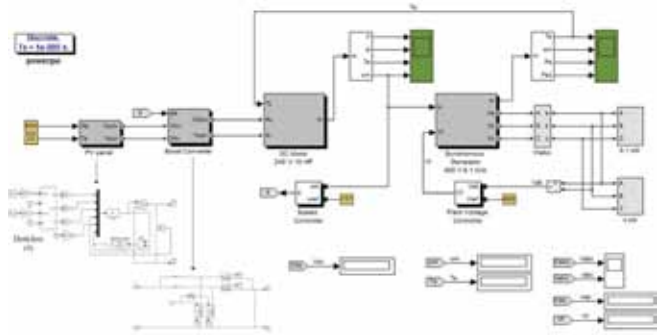
Güneş hücreleri genellikle düşük çıkış güçlerine sahiptir (1-2 Watt). Daha yüksek güçler elde edebilmek için bu hücreler birbirlerine seri ve/veya paralel olarak bağlanırlar. Seri bağlantılar çıkış gerilimini artırırken, paralel hücre bağlantıları çıkış akımını yükseltir.

Güneş hücresi üreten firmalar genellikle açık devre gerilimi (Voc), kısa devre akımı (Isc), maksimum güç gibi büyüklükleri kataloglarında bulundurlar. Bu yüzden elde edilen büyüklüklerin bilinen değerler olan Voc ve Isc cinsinden ifade edilmesi gerekmektedir. IFV akımı ışınımaya bağlı olduğundan denklem (5)'te ki gibi ifade edilebilir [9].

$$I_{FV} = I_{sc} \times k \quad (5)$$

Burada k standart koşullarda anlık ışınım seviyesini göstermektedir. Bazı yaklaşımlar ile güneş hücresi çıkış akımı (I0); ve modül çıkış akımı (I0M) Isc ve Voc'ye bağlı olarak ifade edilirse;

$$I_0 = I_{sc} \left[1 - e^{\left(\frac{V_0 - V_{oc} + I_0 R_s}{aV_T} \right)} \right] \quad (6)$$



Şekil 2: Sistemin simülasyon modeli

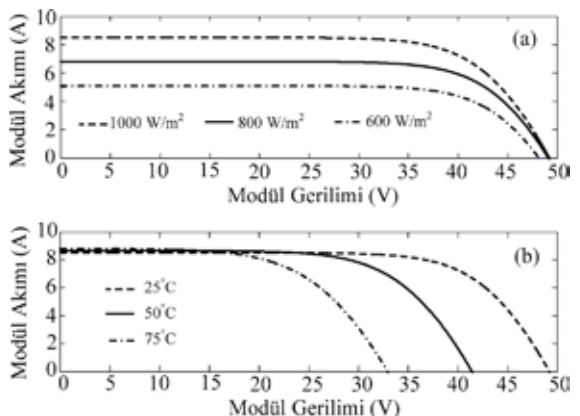
$$I_0^M = I_{sc}^M \left[1 - e^{\left(\frac{V_0^M - V_{oc}^M + R_s^M I_0^M}{N_{SM} a V_T^M} \right)} \right] \quad (7)$$

Burada NPM ve NSM sırasıyla paralel ve seri bağlı hücre sayısını, VOCC; hücrenin açık devre gerilimini verir. Üst indis "M" modülü temsil ederken, "C" ise hücreyi ifade etmektedir.

$$\begin{aligned} I_{sc}^M &= N_{PM} I_{sc}^C \\ V_{oc}^M &= N_{SM} V_{oc}^C \\ R_s^M &= \frac{N_{SM}}{N_{PM}} R_s^C \end{aligned} \quad (8)$$

$$\text{Böylece modül akımı : } I_0^M = N_{PM} I_{sc}^C \left[1 - e^{\left(\frac{V_0^M - N_{SM} V_{oc}^C - N_{SM} a V_T^M I_0^M}{N_{SM} a V_T^M} \right)} \right] \quad (9)$$

olarak elde edilebilir. Her güneş hücresinin maksimum güç çektiği bir kırılma noktası vardır. Bu noktaya maksimum güç noktası denilir. Şekil 3'de üretici katalogu [10] baz alınarak modellenen güneş modülünün I-V karakteristikleri elde edilmiştir. Şekil 3a'da görüldüğü gibi panellere gelen ışınım değeri azaldıkça kısa devre akımı azalmaktadır. Sıcaklık değişimi bu akımı fazla etkilemezken, çıkış gerilim değeri ortam sıcaklığı arttıkça düşmektedir (Şekil 3b).



Şekil 3: a) Farklı ışınım değerleri b) Farklı sıcaklık değerleri

3. Enerji Sisteminin Modellenmesi

Güneş enerjisi tabanlı yenilenebilir enerji sisteminin modellenmesi ve kontrolü için Matlab@Simulink paket programından yararlanılmıştır. Sistem temel olarak FV

panel modeli, DA-DA yükseltici konvertör modeli, senkron jeneratör ve bu modüllerin kontrolü için temel oransal-integral (PI) kontrolörlerden oluşmaktadır. Tasarlanan sistemin Matlab@Simulink modeli Şekil 2'de görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi dışarıdan girilen ışınlım (800 W/m²) ve ortam sıcaklığı (250C) değerleri ile FV panelden 48V'luk bir gerilim elde edilmektedir. Benzetim ortamında; ışınlım ve sıcaklık değerlerinin sabit olması ve direnç vb. gibi devre elemanlarının dış ortamdan etkilenmemesinden dolayı bu gerilimin değeri sabit olmaktadır. Elde edilen 48 V'luk DA gerilim, doğru akım motorunu tahrik edebilmesi için yükseltici tip bir DA-DA konvertörün giriş uçlarına uygulanmaktadır. Yükseltici birimi birbirine paralel bağlı olan iki kollu interleaved yükseltici konvertörden oluşmaktadır.

Konvertörün her kolu aynı anahtarlama frekansında çalışmaktadır. Anahtarlama frekansı olarak 3.3kHz seçilmiştir.

Yüksek anahtarlama frekansı ile pratikte kullanılacak elemanların boyutları düşürülecektir. Anahtarlama uygulanan anahtarlama süresi 360/N derece faz farkına sahiptir. Burada N, konverterde bulunan kol sayısını belirtmektedir. Tasarlanan konvertör iki bacaklı olduğundan anahtarlama süreleri arasında 180 faz farkı olmaktadır. Böylesi bir konvertör de giriş akımı iki eşit parçaya bölünerek konvertörde kullanılan indüktanslar üzerindeki akım baskısı azaltılmaktadır. Ayrıca konvertör süreksiz akım modunda çalıştırılmıştır. Böylesi bir anahtarlama yapısı, indüktansın aşırı ısınmasını önleyecek ve indüktans üzerindeki akım baskısının azaltılmasına yardımcı olacaktır. Konvertörün görev

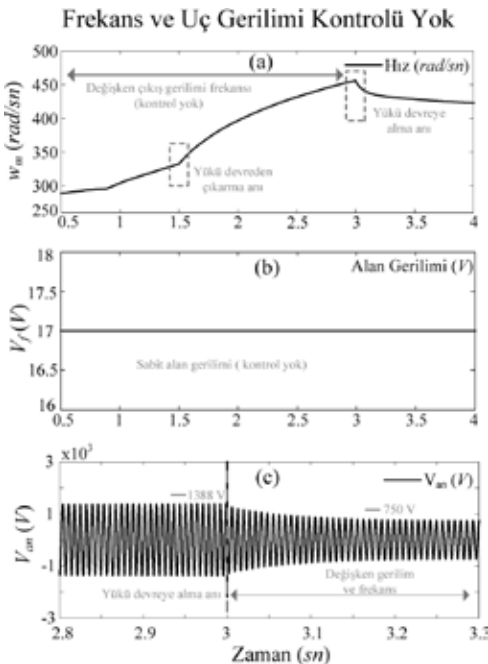
periyodunun kontrolü ile çıkış geriliminin değeri kolayca ayarlanabilmektedir.

Unutulmamalıdır ki pratikte indüktans tasarımında oluşacak parametrik sapmalar yük ve indüktans akımının eşit olarak dağılamamasına neden olacaktır. Konvertör çıkışından elde edilen doğru gerilim ile DA motorunun hızı ayarlanmaktadır.

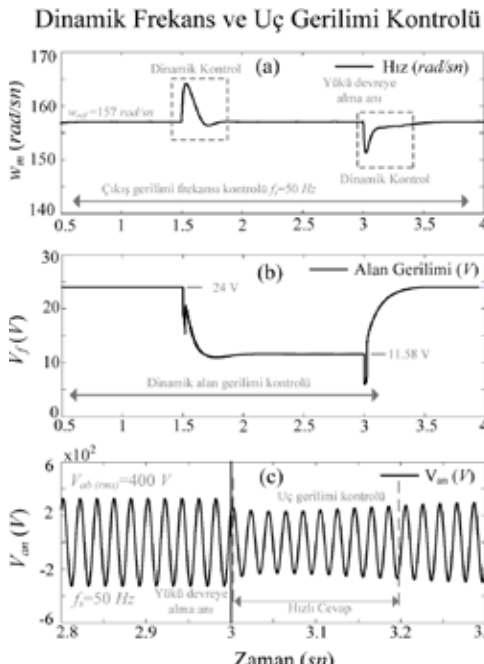
Şekil 2'de de görüldüğü gibi DA motoru ile senkron jeneratör birbirine akuple edilmiştir. DA motorunun hızı ayarlanarak aslında senkron jeneratörde elde edilen gerilimin frekansı ve genliği belirlenmektedir.

Hız kontrol bloğunda gerçek rotor hızı ile referans rotor hızı ($\omega_m=157\text{rad/sn} \Rightarrow 50\text{ Hz}$ 'lik senkron jeneratör uç gerilimi) karşılaştırılarak, aradaki fark PI giriş kontrolör değeri olarak belirlenmiştir. Tasarlanan kontrolörün yapısı Şekil 6'a da görülmektedir. Kontrolörde kullanılan oran katsayısı $K_p=0.03$ ve integral katsayısı $K_i=0.5$ olarak belirlenmiştir. Bu katsayı parametreleri belirlenirken konvertörün yük değişimine karşı oldukça hızlı cevap verebilmesi durumu göz önüne alınmıştır. Ayrıca görev periyodu değişimi [0-95] arasında sınırlandırılmıştır.

Bir senkron jeneratörde elde edilen uç geriliminin büyüklüğü, yük durumundan bağımsız olarak sabit genlikte ve istenilen frekansta olmalıdır. Bir senkron jeneratörde uç geriliminin büyüklüğü ve frekansı; rotorun dönme hızına ve rotordaki akıya (rotora verilen DA alan gerilim) bağlıdır. Tasarlanan sistemde senkron jeneratörün rotor dönme hızı $\omega_m=157\text{rad/sn}$ yani 50 Hz olarak ayarlanmıştır. Sistemde



Şekil 4: Frekans ve çıkış gerilimi kontrolü yok iken a) Rotor Hızı b) Alan gerilimi c) Uç gerilimi (V_{ar})



Şekil 5: Dinamik ve Frekans uç gerilimi kontrolü a) Rotor Hızı b) Alan gerilimi c) Uç gerilimi (V_{ar})

oluşacak herhangi bir yük değişimine karşı DA motoruna verilen gerilim yükseltici konvertör ve PI-Hız kontrolör ile ayarlanarak sistemin sabit hızda dönmesi sağlanmıştır.

Senkron jeneratörde frekans kontrolünün yanı sıra alan gerilimi kontrolü de gerekmektedir. Sistemde oluşacak herhangi bir yük değişiminde özellikle indüktif yükte yüklenme durumunda senkron jeneratörün uç gerilimi düşecek, bu durumda alan akımı kontrolüyle uç gerilimi sabit tutulmaya çalışılacaktır.

Senkron jeneratörün

omik-indüktif bir yük ile yüklenmesi durumunda meydana gelecek bu gerilim düşümünü anlık olarak kompanze etmek gerekmektedir. Bu gerilim düşümünü kompanze etmek ve gerilim regülasyonu amacıyla uyarma gerilimini kontrol etmek için Şekil 6b'de görüldüğü gibi klasik bir PI-Gerilim kontrolör tasarlanmıştır. Senkron jeneratörün çıkış uç geriliminin etkin değeri hesaplandıktan sonra referans gerilim olan 400V'tan çıkartılmaktadır. Daha sonra parametreleri $K_p=0.04$ ve $K_i=0.5$ olan kontrolörden geçirilmektedir. Kontrolör çıkışında gerilimde ani sıçrama olmasını engellemek için [0-24 V] arası bir limit bırakılmıştır.

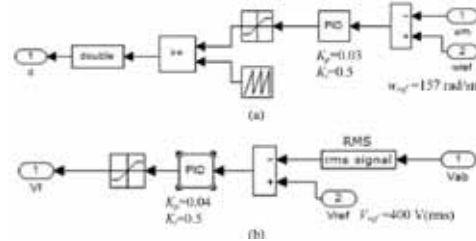
4. Simülasyon Sonuçları

Tasarlanan sistemin güç değeri 8 kVA olarak belirlenmiştir. Sistemin dinamik davranışını gözlemlemek için 1.5 sn aralıklarla yük alınıp daha sonra devreden çıkarılmıştır. Sistem boştaki iken 0.1 kW'lık bir yükte, sonrasında ise 4 kVA'lık omik indüktif bir yük ile yüklenmiştir. Yüklenme sonucunda elde edilen kontrolsüz ve kontrollü sistem performansları sırasıyla Şekil 4 ve Şekil 5'de gösterilmiştir.

Şekil 4a ve Şekil 5a yük devreden çıkarıldığı anda hızda (wm) da meydana gelen değişiklikleri göstermektedir. Şekil 4a'da hız kontrolü olmadığından yük devreden çıktıktan sonra ve devreye alındıktan sonra sistemin herhangi bir şekilde kararlı duruma geçemediği görülmektedir. Oysaki dinamik frekans kontrolü olduğunda Şekil 5a'daki gibi rotor hızının kısa zaman aralığında (<0.5 sn) referans hız bilgisine tekrar ulaştığı net bir şekilde görülmektedir. Şekil 4b ve Şekil 5b'de ise senkron jeneratörün alan sargısına (rotora) verilen DA geriliminin uç gerilimi kontrolü yok ve var iken değerleri görülmektedir. Eğer alan sargısına uygulanan DA gerilim sabit olursa (Şekil 4d) jeneratörün yüklenmesine bağlı olarak çıkış uç geriliminde değişim olacaktır. Sistemin yük durumundan bağımsız olarak sabit çıkış gerilimi verebilmesi için Şekil 5b'deki gibi anlık olarak gerilim kontrolü sağlanmıştır. Son olarak senkron jeneratörün farklı yük durumları altında çıkış gerilimleri dinamik frekans ve uç gerilimi kontrolörlü ve kontrolsüz durumlar için incelenmiştir. Şekil 4c'de görüldüğü gibi 3.sn'de yük devreye alındığı anda gerilimin genliğinin ve frekansının hızlı bir şekilde düştüğü görülmektedir. Şekil 4c'deki sistemde herhangi bir kontrolör olmadığından çıkışta sabit frekansta ve genlikte bir gerilim elde edilememiştir. Oysaki Şekil 5c'de görüldüğü gibi sisteme 4 kW'lık yük devreye alındığında 0.2 sn kadar kısa bir sürede çıkış geriliminin ve frekansının tekrar istenilen değerde sabit olduğu net bir şekilde görülmektedir.

Bu durum bize tasarlanan kontrolörlerin dinamik performansının kabul edilebilir bir düzeyde olduğunu göstermiştir. Sistemin dinamik bileşenlerinin değişmesi durumun-

da kontrolör katsayılarının bu dinamiklere cevap verecek şekilde yeniden düzenlenmesi gerekliliği unutulmamalıdır. Tasarlanan sistemin fiyat/verim oranı dikkate alındığında mevcut inverter tabanlı sistemlere göre daha makul sonuçlar verdiği görülmektedir.



Şekil 6: a) Hız kontrolörü b) Gerilim kontrolörü

5. Sonuçlar

Fotovoltaik sistemlerde “adalanma(islanding)” etkisi, inverterlerin devre dışı kalmasına neden olmakta, buna bağlı olarak da fabrika gibi lokal sistemler ürettikleri enerjiyi şebekeye basamadıkları için büyük kayıplarla karşılaşabilmektedirler. Ayrıca döküm sanayi gibi sektörlerde enerjinin kesilmesi pota içerisindeki hammaddenin zayı olması ve dolayısıyla büyük kayıplara neden olmaktadır.

Modellenen sistemde uygun kontrolörler kullanılarak dinamik yük değişimi altında sistem davranışı gözlemlenmiş 4+j4 ohm'luk omik indüktif yük etkileri incelenmiştir. Şebekede oluşacak kesintilerde yükün enerjisiz kalmaması için bir model geliştirilmiştir.

1MW'lık bir güneş enerjisi santralinde 2015 yılı için santralden alınan verilere göre üretilen elektrik enerjisi 1,674,945.993 kWh olarak ölçülmüştür. Yapılan enerji maliyet analizine göre tesiste yaşanan elektrik kesintileri sebebi ile bir yıl içerisinde toplam 127,104.51 kWh üretilmesi gereken elektrik enerjisi üretilmemiştir[11]. Bu da yaklaşık olarak tesisin bir aylık üretim miktarına denk gelmektedir. Enerji sürekliliği arz eden bir sistemde yaşanacak böyle bir kesintiye alternatif olarak kurulacak senkron jeneratörlü sistem ile şebekedeki kesintilerden yük etkilenmeden beslenmeye devam edecektir.

Bundan sonraki çalışmada 1 yıllık performans analizi yapılan fotovoltaik bir sistemin enerji kesilmeleri durumunda yıllık kayıp miktarı, inverterli sistemin kayıpları, senkron jeneratörlü sistemin kayıpları ve senkron jeneratörlü sistemin enerji kesintileri durumunda devrede kaldığı süreçte üretebileceği enerji miktarı ve bu sonuçların analizinin yapılması faydalı olacaktır.

*Bu yazı 1-3 Aralık 2016 tarihleri arasında Bursa'da gerçekleştirilen Elektrik, Elektronik ve Biyomedikal Mühendisliği Konferansı ELECO 2016 etkinliğinde sunulan bildiridir.