



OBTAINING THE ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF A PHOTOVOLTAIC ARRAY WITH DC-DC CONVERTERS

Koray Şener Parlak*¹ 

¹Firat University, Technical Vocational High School, Department of Electronics and Automation, Elazığ, Türkiye

Abstract

Original scientific paper

With the increasing use of Photovoltaic modules in daily life, knowing the performance parameters of these modules has become important in terms of usage, design and efficiency studies. DC-DC converters are power electronics circuits used in almost the majority of photovoltaic systems. Since these circuits can also be used as a load emulator, they also offer the opportunity to obtain the electrical characteristic curves of photovoltaic modules. In this study, the electrical characteristics of a photovoltaic array are demonstrated using different types of DC-DC converters. The system was simulated in the Matlab-Simulink environment, and the results were examined both in uniform irradiation and in different partial shade scenarios. Then, it is explained how these characteristics can be used in maximum power point tracker methods by comparing them by considering the converter type used.

Keywords: Electrical characteristics, maximum power point, partial shading conditions, photovoltaics.

DC-DC KONVERTÖRLER İLE BİR FOTOVOLTAİK DİZİNİN ELEKTRİKSEL KARAKTERİSTİKLERİNİN ELDE EDİLMESİ

Özet

Orijinal bilimsel makale

Günlük hayatta fotovoltaik modüllerin kullanımının artmasıyla, bu modüllerin performans parametrelerinin bilinmesi kullanım, tasarım ve verimlilik çalışmaları açısından önemli hale gelmiştir. DC-DC konvertörler hemen hemen fotovoltaik sistemlerin çoğunda kullanılan güç elektroniği devreleridir. Bu devreler aynı zamanda bir yük emülatörü olarak da kullanılabilirliğinden, fotovoltaik modüllerin elektriksel karakteristik eğrilerini elde etme amaçlı da kullanıma olanağı da sunmaktadır. Bu çalışmada bir fotovoltaik dizinin, farklı tip dc-dc konvertörler kullanılarak elektriksel karakteristiklerinin elde edilişi gösterilmiştir. Tasarlanan sistemin Matlab-Simulink ortamında benzetimi yapılarak, hem homojen ışımada hem de farklı kısmi gölge senaryolarında analizi yapılmıştır. Ardından, elde edilen bu karakteristiklerin, kullanılan konvertör tipi de göz önüne alınarak, karşılaştırılmalı olarak maksimum güç izleyici yöntemlerinde nasıl kullanılabilirliği açıklanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Elektriksel karakteristikler, fotovoltaik diziler, kısmi gölge koşulları, maksimum güç noktası.

1 Giriş

Fotovoltaik (Photovoltaic-PV) modüllerin elektriksel karakteristik eğrileri (akım-gerilim I-V ve güç-gerilim P-V), ışınım şiddeti ve sıcaklık gibi değişen çevresel koşullarda modüllerin performansını ve kalitesini tanımlamak için önemli bir göstergedir. Bu karakteristikler, modülün çalışma noktaları ile kısa devre akımı (I_{sc}), açık devre gerilim (V_{oc}) ve maksimum güç noktası (MPP) gibi önemli parametreleri göstermektedir. Bu parametreler, bir PV sistemin tasarımında bilinmesi gereken bilgilerdir [1,2].

PV modüllerin elektriksel karakteristiklerini elde edebilmek için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bu

yöntemlerden en basit olanı değişken direnç yöntemidir [3,4]. Bu yöntemde, PV modülün çıkışına bağlanan bir direncin değeri sıfırdan yaklaşık sonsuza kadar değiştirilip, modülün kısa devreden açık devre olana kadar çalışması sağlanır. Bu sırada modülün akım ve gerilim değerleri ölçülerek elektriksel karakteristikler elde edilir. Maliyeti oldukça düşük olmasına rağmen değişken direnç yönteminin yüksek güçlü PV dizilerine uygulanması zordur ve direncin adım adım değiştirilmesi zaman almaktadır. Ayrıca pürüzsüz bir eğri elde edebilmek için oldukça fazla sayıda direnç değişkeni kullanmak gerekir ki, bu da uygulamayı güçleştirmektedir [5].

Elektronik yük yönteminde, genellikle MOSFET olarak seçilen yarı iletken anahtarlama elemanı, PV

* Corresponding author.

E-mail address: ksparlak@gmail.com (K. Ş. Parlak)

Received 09 December 2021; Received in revised form 11 March 2022; Accepted 25 March 2022

2587-1943 | © 2022 IJIEA. All rights reserved.

Doi: <https://doi.org/10.46460/ijiea.1034743>

modülün çıkışına bir yük gibi bağlanarak elektriksel karakteristikleri çıkarılabileceği gösterilmiştir [6-7]. Bu yöntemde anahtarlama elemana uygulanan modülasyon sinyali ile kapı-yayıcı (gate-source) gerilimi değiştirilirken, kanal akımı (Id) kontrol edilebilir. Böylelikle, uygulanan modülasyon sinyali ile PV diziden 0-Isc aralığında bir akım akması sağlanarak modülün elektriksel eğrileri elde edilebilmektedir. Burada PV diziden üretilen güç anahtarlama elemanında harcandığından, anahtarlama elemanının güç ve ısı kısıtlamalarından dolayı yüksek güçlerde çalışmaya olanak vermemektedir. Ayrıca anahtarlama elemanının doğrusal bir çalışma karakteristiği olmadığından, PV modül eğrilerinin bazı bölgelerinde yetersiz doğrulukta verilerin elde edilmesine neden olmaktadır [8,9].

“Dört Bölge Güç Kaynağı” olarak adlandırılan yöntemde, PV modüle bağlanan cihaz içinde bulunan gerilim kaynağının değeri ayarlanarak, modüle hem akım akıtan hem de akım çekebilen bir topoloji oluşturulmaktadır [10,11]. Bu gerilim kaynağının değeri, PV modülden 0-Isc aralığında akım çekilecek şekilde ayarlanarak modülün elektriksel karakteristikleri çıkarılabilmektedir. Cihazın içinde bulunan elektronik anahtarlama elemanlarının kontrolüyle elde edilen farklı gerilim değerleri ile PV modül farklı bölgelerde çalıştırılabilmektedir. Burada PV modülün elektriksel karakteristikleri birinci bölgede elde edilmektedir. Elektronik yük cihazlarının temelini oluşturan bu yöntemle, yakıt hücreleri ve bataryalar gibi diğer çeşitli doğru akım güç kaynakları da test edilebilmektedir. Maliyetinin yüksek olmasının yanında elektronik yük cihazı ile daha yüksek güç seviyelerinde ölçümler yapılabilmekte ve daha çok örnek ile elektriksel karakteristikler hızlı ve doğru bir şekilde çıkarılabilmektedir.

Sayısal çözümleme yöntemleriyle yapılan yapay zekâ tabanlı yöntemlerde, üretici firma tarafından verilen belirli parametreler ile PV hücreye ait denklemler çözdürülerek, panel/dizinin elektriksel karakteristikleri elde edilebilmektedir. Ancak bu çözümler, üzerinde işlem yapılan hücre/panele özgü olduğundan, farklı tipteki PV modüller için yeniden başlangıç parametrelerinin ayarlanması gerekmektedir. Bu yöntemler donanımsal olmadığı için karakteristiği çıkarılacak PV dizinin bağlantı yapısının da algoritmaya veri girişi olarak verilmesini gerektirmektedir. Ayrıca bu yöntemlere ait algoritmaların karmaşıklığının yanı sıra, kısmi gölge şartlarındaki performansları yetersiz olabilmektedir [12-14].

PV dizinin çıkışına bağlanan bir kondansatörün şarj karakteristiği incelendiğinde, şarj süresi boyunca bağlı olduğu uçlara göre direnci $0-\infty$ değişmektedir. PV modüle bir yük gibi bağlanan kondansatörün deşarjdan tam şarj olana kadar, modülden $I_{sc}-0$ aralığında akım çekilmesi sağlanabilir. Dolayısıyla bu şarj süresi boyunca ölçülen akım ve gerilim parametreleri ile PV modülün elektriksel karakteristikleri elde edilebilmektedir [15]. Bu yöntemde, farklı güçlerdeki PV diziler ve yüksek bir eğri çözünürlüğü sağlayabilmek için kapasite bankları kullanılmaktadır. Buradaki farklı kapasitelerin devreye alınıp çıkarılması, elektronik anahtarların kontrolüyle sağlanmaktadır. Dolayısıyla bu yöntem, fiziksel olarak

yüksek bir hacim gerektiren ölçüm standartlarını gerektirmektedir [16].

DC-DC konvertörlerin voltaj dönüşüm oranının değiştirilmesiyle elde edilen sanal bir direnç yükü ile PV dizinin elektriksel karakteristiklerin elde edilmesi mümkün olmaktadır [17-19]. Bu voltaj dönüşümü, görev periyodu [0-1] arasında değiştirilerek yapılabilmektedir. Böylece konvertör, PV modülün çıkışında bir direnç emülatörü gibi çalışarak modülün elektriksel karakteristiklerinin elde edilebilmektedir. Farklı topolojideki dc-dc konvertörlerin görev periyodunun değişimi programlanarak, bir direnç yükü gibi emüle edilebilmektedir. Bu yöntemde konvertörün yükü, elektriksel karakteristiğin çıkarımını etkilediğinden, karakteristiklerin doğruluğunu arttırmak için bir dijital-analog dönüştürücü ile sistem yükünü ayarlanan metotlar geliştirilmiştir. Bu uygulamalarda konvertörün sürekli iletim modunda kalacak şekilde tasarlanması gerekmektedir. Ayrıca bu elektronik anahtar nedeniyle oluşan akım ve gerilimde oluşan sıçrama ve dalgalanmalar bu yöntemin dezavantajıdır [20,21]. Bununla beraber yöntemin sadeliği, maliyeti ve pratik olarak uygulanabilirliği nedeniyle cuk tip dc-dc konvertörde yük optimizasyonu yapan bir algoritma ile PV dizinin elektriksel karakteristikleri çıkarabilen taşınabilir bir cihaz geliştirilmiştir [22].

Yukarıda açıklamaları yapılan ve literatürde bulunan elektriksel karakteristik çıkarım yöntemlerinin karşılaştırmaları Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Elektriksel karakteristik çıkarım yöntemlerinin genel bir karşılaştırması.

Yöntem	Doğruluk	Tarama Hızı	Maksimum Güç	Çözünürlük
Direnç Yükü	Düşük	Düşük	Düşük	Düşük
Kondansatör Yükü	Yüksek	Orta	Yüksek	Yüksek
Elektronik Yük	Orta	Orta	Düşük	Orta
Dört Bölge	Yüksek	Orta	Orta	Yüksek
DC-DC Konvertör	Yüksek	Orta	Yüksek	Yüksek

Bu çalışmada buck, boost ve cuk tip dc-dc konvertörün bir direnç yükü gibi emüle edilerek seri bağlı 4 panelden oluşan PV dizinin elektriksel karakteristik eğrileri elde edilmiştir. Makalenin amaçlarından biri bu konvertör tiplerinin birbirleriyle olan farklarını gösterebilmektir.

Önerilen yöntemin avantajları şu şekilde sıralanabilir:

- DC-DC konvertörler, PV sistemlerin hemen hepsinde kullanılan devrelerdir. Karakteristikleri çıkarmak için bu devreler kullanılacağından, ilave herhangi bir donanıma ihtiyaç duyulmamaktadır.
- Karakteristik eğrileri elde etmek için PV modülün parametrelerine ve dizinin bağlantı yapısıyla ilgili bir bilgiye ihtiyaç bulunmamaktadır.
- Bu yöntem, homojen ışımının yanı sıra kısmi gölge şartlarında da başarılı bir şekilde uygulanabilmektedir.

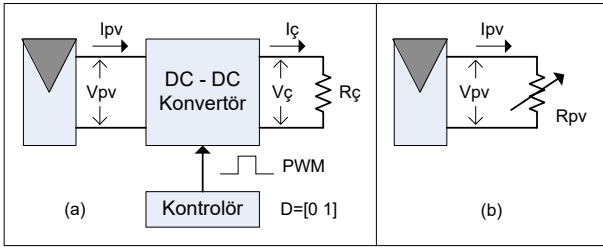
Bu avantajlar doğrultusunda yapılan çalışmanın bilimsel katkısı; eğrilen elde edilmesi ile dizinin o anki çevresel şartlardaki gerçek MPP’ye ait bilgiler de elde edildiğinden, yüksek verimli ve sade bir algoritmaya sahip

bir MPPT yönteminin geliştirilmesine olanak sağlamak olacaktır.

Bu çalışmada yapılan simülasyonlar hem homojen ışımada hem de farklı kısmi gölge senaryolarında gerçekleştirilerek sonuçlar karşılaştırılmıştır. Ayrıca elde edilen bu eğrilerin MPPT uygulamalarında nasıl kullanılabileceği irdelenmiştir.

2 DC-DC Konvertörün Bir Yük Olarak Emülasyonu

DC-DC konvertörlerin PV sistemlerde oldukça geniş bir kullanım alanı vardır. Bu alanlardan biri de, konvertörün değişken yük olarak emüle edilmesiyle PV dizinin elektriksel karakteristiklerinin elde edilmesidir. Şekil 1.a'da gösterildiği gibi, konvertör görev periyodunun (D) [0-1] aralığında değiştirilmesi ile PV modülün çıkışında değişken bir yük gibi davranmasını sağlanabilmektedir (Şekil 1.b). Bu çalışma durumunda konvertörün bir yük gibi emüle edilmiş olur ve PV modül çıkışının açık devreden kısa devre aralığında çalışmasına olanak sağlanır.



Şekil 1. (a) DC-DC konvertör ile PV modül elektriksel karakteristiğinin elde edilmesi. (b) Modül tarafından görülen eşdeğer direnç.

Herhangi bir dc-dc konvertör için akım ve gerilim için kazanç "G", şu şekilde tanımlanabilir [23]:

$$\frac{V_{\text{ç}}}{V_{\text{pv}}} = \frac{I_{\text{pv}}}{I_{\text{ç}}} = G \quad (1)$$

Konvertör çıkış gerilimi:

$$V_{\text{ç}} = R_{\text{ç}} \cdot I_{\text{ç}} \quad (2)$$

Denklem (1) ve (2) birlikte kullanılarak denklem (3) şu şekilde elde edilebilir:

$$R_{\text{pv}} = \frac{V_{\text{pv}}}{I_{\text{pv}}} = \frac{R_{\text{ç}}}{G^2} \quad (3)$$

Denklem (3)'den görüldüğü gibi PV modülün çıkış direnci olan R_{pv} , konvertör kazancına bağlıdır. Dolayısıyla R_{pv} 'nin değişimi, seçilen konvertörün tipine göre değişiklik gösterecektir. Sürekli iletim modunda R_{pv} 'nin konvertör tipine göre olan fonksiyonu, Tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo 2. Temel konvertör tipleri için D'ye bağlı R_{pv} fonksiyonları.

Konvertör Tipi	R_{pv}	R_{pv} (D=0)	R_{pv} (D=1)
Buck	$R_{\text{ç}}/D^2$	∞	$R_{\text{ç}}$
Boost	$R_{\text{ç}}(1-D)^2$	$R_{\text{ç}}$	0
Buck-Boost, Cuk, SEPIC	$R_{\text{ç}}((1-D)/D)^2$	∞	0

PV dizinin I-V veya P-V eğrilerinin tamamıyla taranabilmesi için, PV çıkış akımının, 0 ile kısa devre akımı (I_{sc}) arasında değişmesi gerekir. Bir başka ifadeyle emüle edilen direncin, 0 dan sonsuza kadar değişmesi gerekir. Sadece buck-boost, cuk ve SEPIC topolojilerinin bu durumu sağladığı, Tablo 2'den görülmektedir.

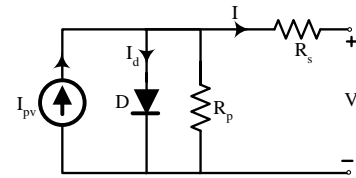
3 I-V ve P-V Eğrilerinin Elde Edilmesi ve Simülasyon Sonuçları

Bir PV panelin I-V ve P-V eğrilerini elde edebilmek için panelin birçok çalışma noktasına ait akım ve gerilim değerini elde etmek gerekir. Bu değerler panelin kısa devre konumundan açık devreye geçişi sırasında elde edilen verilerdir. Bu geçişi sağlamak için panelin beslediği yükü çok küçük dirençten (~ 0 ohm) çok yüksek dirence ($\sim \infty$ ohm) kadar değiştirmek gerekir. Bu değişim esnasında PV sistemin akım ve gerilim çıkışları ölçülerek I-V ve P-V eğrileri çıkarılabilir. Yukarıda açıklandığı gibi bu direnç değişiminin benzetimi, dc-dc konvertörün görev periyodunu [0-1] aralığında değiştirerek sağlanabilir.

Bu çalışmada sırasıyla buck, boost ve cuk tip dc-dc konvertörlerin bir direnç yükü gibi benzetimi yapılarak, seri bağlı 4 PV panelden oluşan dizinin elektriksel karakteristik eğrileri elde edilecektir. Bu eğriler hem homojen ışımada hem de farklı kısmi gölge şartlarında gerçekleştirilecektir. Elde edilen eğrilerin doğruluğunu göstermek için bir kondansatörün PV dizinin çıkışına bağlanarak elde edilen eğriler referans alınarak karşılaştırılmıştır. Önceki bölümde açıklandığı gibi kondansatör bağlama yönteminde, bir kondansatörün PV dizinin çıkışına yük olarak bağlanarak, dizinin o anki ışımaya ve sıcaklık koşullarındaki elektriksel karakteristikleri çıkarılabilmektedir.

3.1 PV Hücre Modeli

Bu çalışmada, paralel direncin de dâhil edildiği tek-diyotlu - beş parametrelili PV devre modeli kullanılmıştır. Bu model, basitliği ve yüksek doğruluğa sahip olması nedeniyle oldukça sık tercih edilmektedir. Bir PV hücrelerin tek diyotlu model eşdeğer devresi Şekil 2'de görülmektedir.



Şekil 2. Fotovoltaik hücrenin eşdeğer devresi.

Modelde verilen akım kaynağı (I_{pv}), üretilen fotoelektrik akımına karşılık gelmektedir. Paralel direnç (R_{p}) sızıntı akımını, seri direnç (R_{s}) ise çıkıştaki gerilim düşümünü temsil etmek için kullanılır [24].

Denklem (4), bir PV hücrenin I-V karakteristiğini tanımlamaktadır.

$$I = I_{\text{pv}} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V+R_{\text{s}}I}{V_{\text{tA}}}\right) - 1 \right] - \frac{V+R_{\text{s}}I}{R_{\text{p}}} \quad (4)$$

Yukarıda verilen parametrelere ilave olarak (4) denkleminde ki diğer parametreler aşağıdaki gibidir:

A : Diyot idealite sabiti

V_t : Jonksiyon termal gerilim sabiti

K : Boltzman sabiti ($1.38 \cdot 10^{-23}$ j/K°)

Q : Elektron yükü ($1.602 \cdot 10^{-19}$ C)

Oluşturulan olan bu model 5 parametrelili model olarak adlandırılmaktadır. Bu şekilde adlandırılmasının nedeni, modelin tanımlanabilmesi için I_{pv} , I_o , R_s , R_p ve A parametrelerine olan ihtiyaçtan dolayıdır.

Akım kaynağından üretilen fotoelektrik akımının (I_{pv}) değeri ışınma miktarı ve sıcaklık değerlerine bağlı olarak değişmektedir. Akım kaynağı tarafından üretilen akım denklem (5) yardımıyla bulunmaktadır.

$$I_{pv} = \frac{G}{G_n} (I_{scn} + K_i(T - T_n)) \quad (5)$$

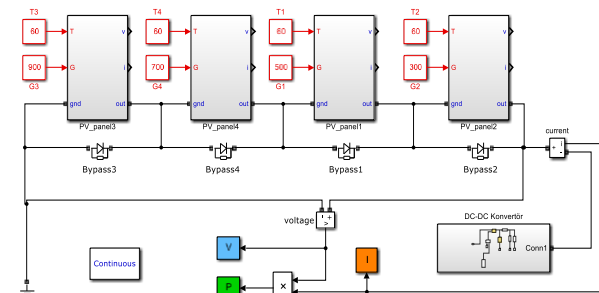
Burada I_{scn} , standart test şartlarındaki (STC- $G_n = 1000$ W/m², $T_n = 25$ C° ve air mass (AM)=1.5) kısa devre akımıdır. T ve T_n ise sırasıyla gerçek ve nominal sıcaklık [K] değerleridir. G [W/m²] cihaz yüzeyine düşen ışınım miktarı, G_n ise nominal ışınım değeridir. K_i [A/K] sabiti kısa devre akımının sıcaklık katsayısı olup ürün kataloglarında verilmektedir. Denklem (4-5), diyot elektriksel karakteristik denklemi ve diğer PV hücre denklemleri, sayısal çözümlene teknikleri içinde kullanılarak, Matlab ortamında m-file olarak PV panel modeli oluşturulmuştur.

Tablo 3. Simülasyonda kullanılan PV panel parametreleri.

Maksimum güç (P _{MAX})	55 W
Maksimum güç noktasındaki gerilim (V _{MPP})	18.5 V
Maksimum güç noktasındaki akım (I _{MPP})	3.5 A
Açık devre gerilimi (V _{oc})	22.3 V
Kısa devre akımı (I _{sc})	3.85 A
Akımın sıcaklık katsayısı(t_i)	2.0 mA/C°
Gerilimin sıcaklık katsayısı(t_v)	-60.8 V/C°
Gücün sıcaklık katsayısı	-0.38 %/C°

3.2 Simülasyonlar

Matlab-Simulink ortamında buck konvertör ile yapılan simülasyon ait örnek bir görsel Şekil 3'de verilmiştir. Geliştirilen modelde sıcaklık ve ışınma değerleri her bir panele ayrı ayrı girilebilmektedir. Simülasyonlarda kullanılan konvertörlerin anahtarlama frekansları 10 KHz. olup devre parametreleri aşağıdaki Tablo 4'de verilmiştir.

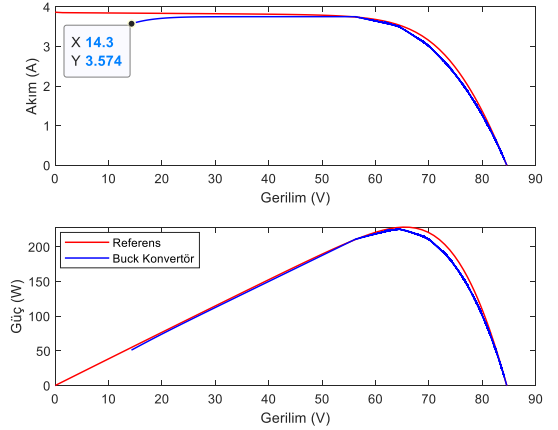


Şekil 3. Simulink ortamında yapılan simülasyona ait bir görsel.

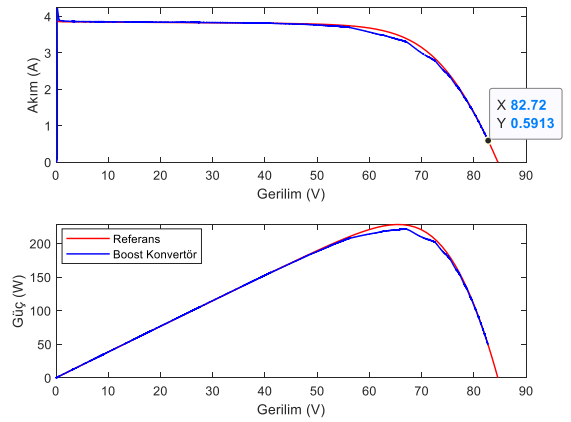
Tablo 4. Konvertörlerde kullanılan devre elemanlarının parametreleri.

Konvertör Tipi	L1 (H)	L2 (H)	C (µF)	Rç (Ω)
Buck	10m	-	100	4
Boost	5m	-	200	140
Cuk	10m	1m	100	20

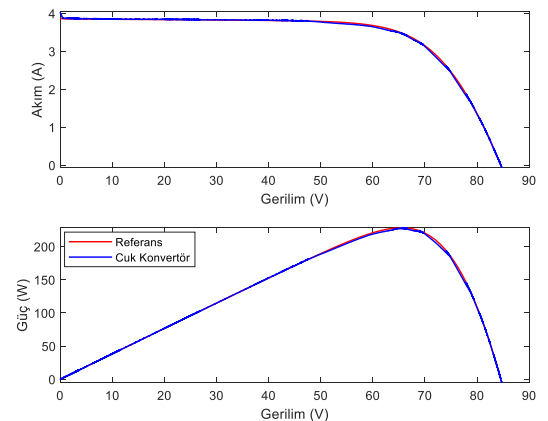
Simülasyonlar, PV panellere farklı ışınma değerleri ve 60° sabit sıcaklık değeri verilerek yapılmıştır. Kullanılan PV panellere ait kısa devre akımı, açık devre gerilimi ve maksimum güç değerleri sırasıyla 3.7A, 21V ve 55W. dır. Şekil 4-15'de, PV dizinin farklı ışınmalar altında, I-V ve P-V eğrilerine ait simülasyon sonuçları verilmiştir.



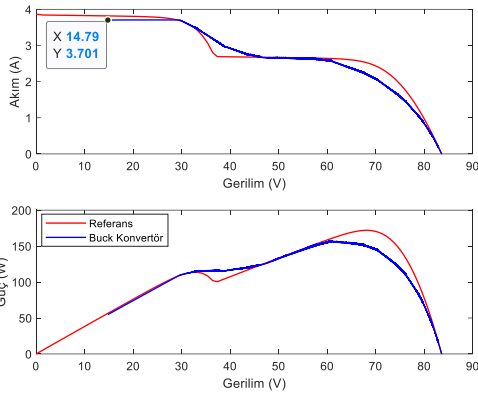
Şekil 4. (1000-1000-1000-1000) W/m² ışınmada buck konvertör ile elde edilen karakteristikler.



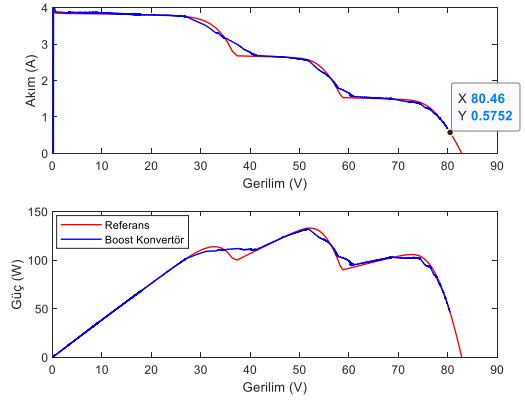
Şekil 5. (1000-1000-1000-1000) W/m² ışınmada boost konvertör ile elde edilen karakteristikler.



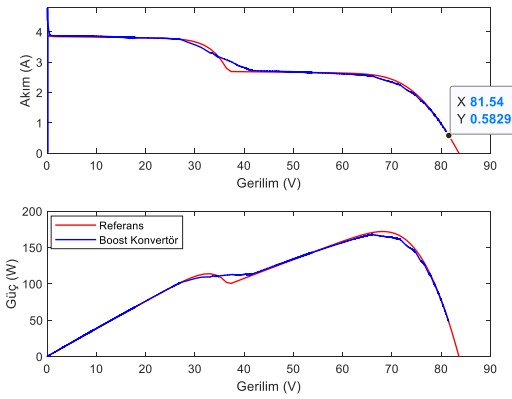
Şekil 6. 1000-1000-1000-1000) W/m² ışınmada cuk konvertör ile elde edilen karakteristikler.



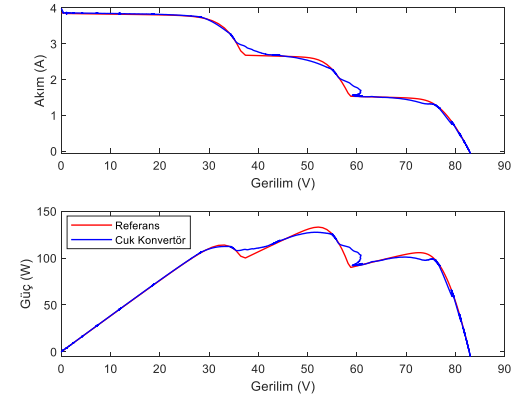
Şekil 7. (1000-1000-700-700) W/m² ışımada buck konvertör ile elde edilen karakteristikler.



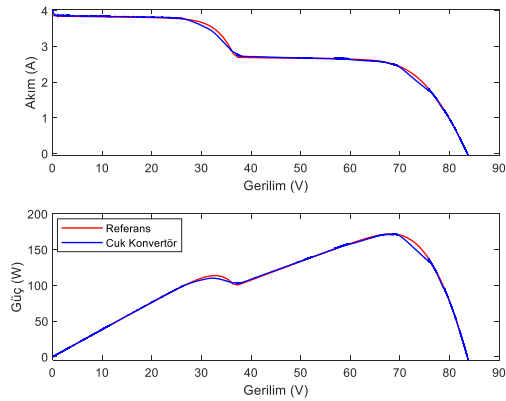
Şekil 11. (1000-1000-700-400) W/m² ışımada boost konvertör ile elde edilen karakteristikler.



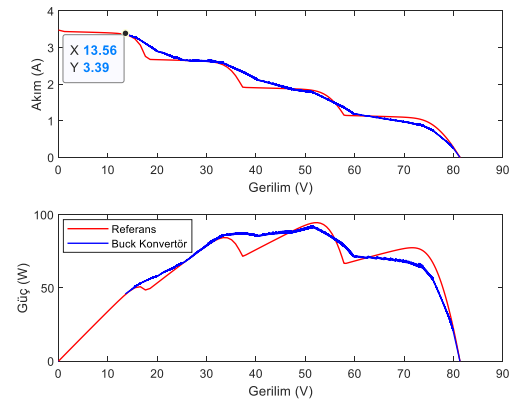
Şekil 8. (1000-1000-700-700) W/m² ışımada boost konvertör ile elde edilen karakteristikler.



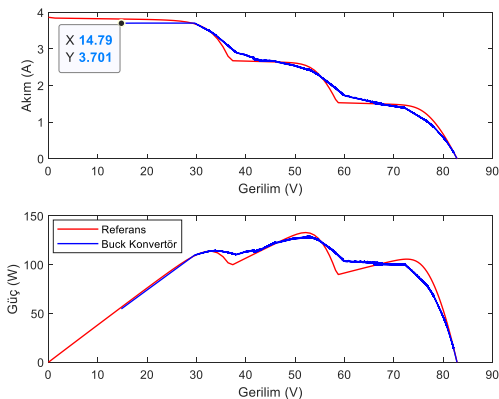
Şekil 12. (1000-1000-700-400) W/m² ışımada cuk konvertör ile elde edilen karakteristikler.



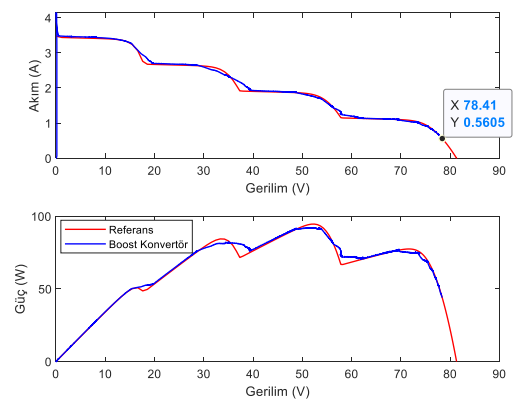
Şekil 9. (1000-1000-700-700) W/m² ışımada cuk konvertör ile elde edilen karakteristikler.



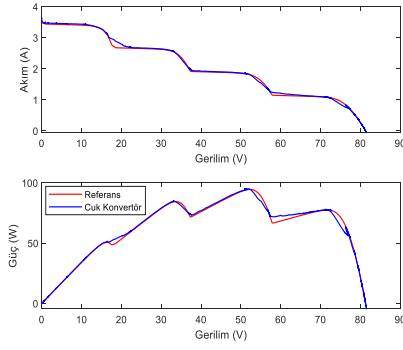
Şekil 13. (900-700-500-300) W/m² ışımada buck konvertör ile elde edilen karakteristikler.



Şekil 10. (1000-1000-700-400) W/m² ışımada buck konvertör ile elde edilen karakteristikler.



Şekil 14. (900-700-500-300) W/m² ışımada boost konvertör ile elde edilen karakteristikler.



Şekil 15. (900-700-500-300) W/m² ışımada cuk konvertör ile elde edilen karakteristikler.

Simülasyon sonuçlarından görüldüğü gibi, her üç tip konvertör ile elde edilen eğriler, referans eğrilerin bazı kısımlarından ayrılsa bile büyük ölçüde uyuşmaktadır. Ayrıışan bölgeler, kritik yerler olan MPP'lerde olmakla birlikte, yine de bu noktaları tanımlamaktadır.

Buck konvertör ile yapılan simülasyonlarda, Tablo 2' de belirtildiği gibi, PV dizinin yük direnci [$R_{\text{ç}} - \infty$] aralığında olacak şekilde eğrilerin elde edildiği görülmektedir. Örneğin; Şekil 7'de, yük direnci 4Ω ($14.79/3.701$)'dan büyük çalışma noktaları için I-V ve P-V eğrileri çıkarılmıştır. Bilindiği gibi bir PV modülün çalışma noktası, I-V eğrisi ile yük eğrisinin kesiştiği yere karşılık gelmektedir. $R_{\text{ç}}$ 'dan küçük yük direnci bölgesinde eğri elde edilemese bile, MPP'ler bu bölge içinde oluşmamaktadır. Bununla beraber, PV dizi içindeki seri bağlı modül sayısı ve dizinin bu seri bağlı kısımlarına düşen ışımaya çeşitliliğine bağlı olarak MPP sayısı oluşacağından, Buck konvertör için yük direnci en fazla 0.8-0.9.Voc(modül) olarak seçilmelidir. Bilindiği gibi, eğri üzerinde oluşan MPP'ler, ışımaya çeşitliliğine göre bu nokta ile 0.8-0.9.Voc(modül) gerilim değeri arasında oluşmaktadır. Bu seçim, eğri üzerindeki bütün MPP'lerin gösterilebileceği elektriksel karakteristiği elde edebilmek için önemli bir kriterdir.

Boost konvertör ile ilgili şekillerden görüldüğü gibi I-V ve P-V eğrileri, PV dizinin yük direnci [$0 - R_{\text{ç}}$] aralığında elde edilmiştir. Örneğin; Şekil 14'de, yük direnci 140Ω ($78.41/0.5605$)'dan küçük değerler için bu eğriler çıkarılmıştır. Yine bu konvertör tipinde de bütün ışımaya değerlerinde oluşan MPP'ler, eğriler üzerinde tanımlanabilmiştir. Bu konvertör uygulamasında yük direncinin, en az 0.8-0.9.Voc(dizi)'ye olacak şekilde seçilmesi gerekir. Bu seçim, her türlü ışımaya altında eğri üzerindeki bütün MPP'leri göstermeyi garanti edecektir.

Şekil 6, 9, 12 ve 15'de gösterildiği gibi cuk konvertör ile ilgi sonuçlarda, elektriksel karakteristik eğrilerinin tamamının elde edilebildiği görülmektedir. Dolayısıyla konvertörün yük direncine bağlı olmaksızın her türlü ışımada, hiçbir MPP'yi kaçırmaması söz konusu değildir. Ayrıca bu konvertör tipinde elde edilen eğriler, referans eğrilerine daha yakınsadığı görülmektedir. Bununla beraber cuk konvertörler, diğerlerine göre daha maliyetli olduğu göz önünde tutulmalıdır.

Tablo 2'den ve simülasyon sonuçlarından görüldüğü gibi elektriksel karakteristikler, kullanılan konvertör tipine göre biraz değişkenlik göstermektedir. Buck ve boost konvertör kullanımında yük direncine bağlı olarak karakteristik eğrilerin bir kısmı çıkarılamamaktadır. Eğer konvertör yük direnci eğrilerin büyük bir bölümünü elde

edecek değerde değilse ve önemli noktalar olan bütün MPP'leri bulabilmek amacıyla, bu eğrilerin çıkarımı sırasında uygun değerli bir direnç ile anahtarlama yapılarak, bu problemin önüne geçilebilir.

4 MPPT Uygulamalarında Karakteristik Eğrilerin Kullanımı

PV dizinin elektriksel karakteristiklerinin çıkarılmasının en önemli katkısı, burada elde edilen verilerin kullanılmasıyla MPPT'nin gerçekleştirilebilmesi olacaktır. Çünkü bu veriler içinde, gerek homojen ışımaya gerekse kısmi gölge şartlarında dizinin bütün MPP'ler arasında gerçek MPP'ye ait güç ve gerilim bilgileri yer almaktadır. Dolayısıyla PV dizi bu gerilim noktasında çalıştırılarak, diziden o anki ışımaya ve sıcaklık şartlarında azami güç çekilmesi sağlanabilecektir.

Bir akü veya elektrik motorunun PV dizi tarafından beslendiği uygulamalarda MPPT olarak genellikle Buck veya Boost konvertörler kullanılmaktadır. PV sistem yükün akü/motor olduğunda, yük direnci şarj/yüklü çalışma esnasında değişeceğinden, yük direncinin karakteristik eğrileri elde ederken oluşturabileceği olumsuz etkilerin önüne geçmek için, eğrilerin elde edilmesi esnasında yukarıda anlatıldığı gibi uygun değerli bir direnç ile anahtarlama yapılabilir. (Akü uygulamaların bazılarında MPPT yerine akü şarj algoritmaları kullanılmaktadır).

Şebeke bağlantılı (on-grid) sistemlerde ise son yıllarda genellikle Buck-Boost topoloji tabanlı konvertörler kullanılmaktadır. Cuk konvertör ile ilgili simülasyon sonuçlarından görüldüğü gibi bu konvertörler ile yük direncinden bağımsız olarak elektriksel karakteristik eğrileri bütünüyle elde edilebilmektedir.

Simülasyon sonuçlarından görüldüğü gibi dc-dc konvertör kullanarak elde edilen elektriksel karakteristiklerde, ışımaya bağlı olarak MPP'ler gerçek değerlerinden biraz farklı çıkabilmektedir. Dolayısıyla buradan elde edilen verileri kullanarak gerçekleştirilecek bir MPPT uygulamasında, belli bir oranda verim kaybı yaşanması olasıdır. Bunun önüne geçmek için bu veriler, en kolay MPPT yöntemlerinden olan Değiştir&Gözle (Perturb&Observe - P&O) veya Arttırımsal İletkenlik (Incremental Conductance - InC) algoritmaları ile birlikte kullanılabilir [25-28]. Bilindiği gibi bu iki algoritmanın en önemli dezavantajı, kısmi gölgeleme durumunda gerçek MPP yerine yerel (lokal) MPP'yi bularak başarısız kalabilmesidir. Bunun nedeni algoritmanın, başlangıç şartlarında yerel MPP bölgesinde çalışarak, bu bölgenin en yüksek noktasını bulmasıdır. Bu çalışmada kullanılan yöntem ile gerçek MPP çok keskin bir şekilde elde edilemese bile, gerçek ve yerel MPP'lerin ayrımı görülmektedir. Dolayısıyla gerçek MPP'ye ait gerilim değerinin başlangıç şartı olarak alındığı P&O veya InC yöntemi ile karmaşık olmayan bir algoritmaya sahip, sade bir donanım içeren ve kısmi gölge şartlarında bile oldukça başarılı bir MPPT yöntemi gerçekleştirilebilir.

5 Sonuçlar

Bu çalışmada, farklı tip dc-dc konvertörler kullanılarak bir PV dizinin elektriksel karakteristik eğrilerinin çıkarılması ver bu eğrilerin karşılaştırılması

yapılmıştır. Eğri çıkarma işlemi konvertör görev periyodunun [0-1] aralığında adım adım değiştirilmesi ile gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlarda, konvertör yük direncine bağlı olarak, Buck konvertör için 0 gerilim değerine yakın, Boost konvertör için ise Voc'ye yakın bölgeler hariç, PV dizinin I-V ve P-V eğrileri çıkarılmıştır. Cuk konvertör de ise, eğrilerin tamamı elde edilmiştir.

Eğriler pürüzsüz olmayıp bazı dalgalanmalara sahip olsa da, dizinin o anki ışımaya şiddeti altındaki (gerek homojen gerekse farklı kısmi gölge şartlarında) elektriksel karakteristikleri ve bu eğriler üzerindeki Isc, Voc ve MPP'ler hakkında yeterli bilgileri göstermektedir. Bu bilgiler dizinin bağlantı yapısı, tasarımı ve PV sistemlerde önemli bir konu olan MPPT yönteminin uygulaması konusunda önemli olacaktır.

Açıklamalar

Bu çalışmada Etik Kurul Onay belgesine gerek yoktur.

Kaynaklar

- [1] García, M., Maruri J. M., Marroyo L., Lorenzo E., & Pérez M. (2008). Partial Shadowing, MPPT Performance and Inverter Configurations: Observations at Tracking PV Plants. *Progressive Photovoltaics*, 16, 529–536.
- [2] Durán, E., Andújar, J. M., Galán, J., & Sidrach-de-Cardona M. (2009). Methodology and Experimental System for Measuring and Displaying I-V Characteristic Curves of PV Facilities. *Progressive Photovoltaics*, 17, 574–586.
- [3] Malik, A. Q., Bin, S. J., & Damit, H. (2003). Outdoor testing of single crystal silicon solar cells. *Renewable Energy*, 28, 1433–1445.
- [4] Van, E. E., Gxasheka, A. R., & Meyer, E. L. (2005). Monitoring current-voltage characteristics and energy output of silicon photovoltaic modules. *Renewable Energy*, 30, 399–411.
- [5] Amiry, H. (2018). Design and implementation of a photovoltaic I-V curve tracer: Solar modules characterization under real operation conditions. *Energy Conversion & Management*, 169, 206–216.
- [6] Willoughby, A. A. & Osinowo, M. O. (2018). Development of an electronic load I-V curve tracer to investigate the impact of Harmattan aerosol loading on PV module performance in Southwest Nigeria. *Solar Energy*, 166, 171–180.
- [7] Henni, O., Belarbi, M., Haddouche, K., & Belarbi, E. H. (2017). Design and implementation of a low-cost characterization system for photovoltaic solar panels. *Int. J. Renewable Energy Resources*, 7(4), 1586–1594.
- [8] Sahbel, A., Hassan, N., Abdelhameed, M. M., & Zekry, A., (2013). Experimental performance characterization of photovoltaic modules using daq. *Energy Procedia*, (36), 323–332.
- [9] Batista, V. L. J., Chenlo, F., & Afonso, J. L. (2012). Low-cost instrument for tracing current-voltage characteristics of photovoltaic modules. In: *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'12)*. 1-5.
- [10] De Bias, M. A., Torres, J. L., Prieto, E., & Garcia, A. (2002). Selecting a suitable model for characterizing photovoltaic devices. *Renewable Energy*, 25, 371–380.
- [11] Piliouguine, M., Carretero, J., & Sidrach-de-Cardona, M. (2011). Experimental system for current-voltage curve measurement of photovoltaic modules under outdoor conditions. *Progressive Photovoltaics*, 19, 591–602.
- [12] Feng, X., Qing, X., Chung, C. Y., Qiao, H., & Wang, X. A. (2016). Simple Parameter Estimation Approach to Modeling of Photovoltaic Modules Based on Datasheet Values. *ASME Journal of Solar Energy Engineering*, 138, 051010.
- [13] Elyes, G., & Walid, F. (2019). Photovoltaic module parameters extraction using best-so-far ABC algorithm. *International Conference on Advanced Electrical Engineering (ICAEE)*, 1-5.
- [14] Mohammad, K., Shamsodin, T., Ana-Maria, C., Seyedkazem H., & Edris P. (2020). PSO-based modeling and analysis of electrical characteristics of photovoltaic module under nonuniform snow patterns. *IEEE Access*, 8, 197484-197498.
- [15] Parlak, K. (2020). Obtaining electrical characteristics of a PV module by FPGA based experimental system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45, 33128-33135.
- [16] Chen Z. (2018). A capacitor based fast I-V characteristics tester for photovoltaic. *Energy Procedia*, 145, 381-387.
- [17] Durán, E., Andújar, J., Enrique, J., & Pérez-Oria, J. (2012). Determination of pv generator IV/PV characteristic curves using a dc-dc converter controlled by a virtual instrument. *Int. J. Photoenergy*, 1-14.
- [18] Spiliotis, K., Yordanov, G., Van den Broeck, G., Goverde, H., Baert, K., & Driesen, J. (2017). Towards accurate, high-frequency IV curve measurements of photovoltaic modules applying electronic loads. In: *33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, 1561–1565.
- [19] Zhu, Y., & Xiao, W. (2020). A comprehensive review of topologies for photovoltaic I-V curve tracer. *Solar Energy*, 196, 346-357.
- [20] Zhu, Y. (2018). An adaptive IV curve detecting method for photovoltaic modules. In: *2018 IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC)*, 1–6.
- [21] Dian, S., Wen, X., Deng, X., & Zhang, S. (2014). Digital control of isolated cuk power factor correction converter under wide range of load variation. *IET Power Electronics*, 8, 142–150.
- [22] Thiago A. P., Lenon S., Walbermark M. S., Denizar C. M., & Roberto F. C. (2021). Design of a portable photovoltaic I-V curve tracer based on the dc-dc converter method. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 11(2), 552-560.
- [23] Durán, E., Galán, M., & Sidrach, A.J. (2009). Measuring the IV curve of photovoltaic generators-analyzing different dc-dc converter topologies. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 4–14.
- [24] Hiren P., & Vivek A. (2008). MATLAB-based modeling to study the effects of partial shading on PV array characteristics. *IEEE Trans. on Energy Conversion*, 15, 302-310.
- [25] Zhu, W., Shang, L., Li, P., & Guo, H. (2018). Modified hill climbing MPPT algorithm with reduced steady-state oscillation and improved tracking efficiency. *The J. Engineering*, 17, 1878–1883.
- [26] Abdelsalam, A. K., Massoud, A. M., Ahmed, S., & Enjeti, P. N. (2011). High-performance adaptive perturb and observe MPPT technique for photovoltaic based microgrids. *IEEE Trans. Power Electronics*, 26(4), 1010–1021.
- [27] Elgendy, M. A., Zahawi, B., & Atkinson, D. J. (2013). Assessment of the incremental conductance maximum power point tracking algorithm. *IEEE Trans. Sustainable Energy*, 4(1), 108–117.
- [28] Tey, K. S., & Mekhilef, S. (2014). Modified incremental conductance algorithm for photovoltaic system under partial shading conditions and load variation. *IEEE Trans. Industrial Electronics*, 61(10), 5384–5392.