

	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		
	e-ISSN: 2147-835X Dergi sayfası: http://www.saujs.sakarya.edu.tr		
	<u>Gelis/Received</u> 13.02.2017 <u>Kabul/Accepted</u> 23.03.2018	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.291987	

FV Panellerin modellenmesi için geliştirilen yeni bir FV simülör yapısı

Ersoy Beşer*¹

ÖZ

Güneş hücresi veya dizisi kullanan Fotovoltaik (FV) sistemlerin akım (I) – gerilim (V) ve güç (P) – gerilim (V) karakteristikleri hava koşullarına bağlıdır. Araştırmacıların, tekrarlanabilen laboratuvar koşullarında maksimum güç izleyici veya izleyici algoritmalarının performanslarını tespit edebilmeleri amacıyla güneş hücresi veya dizisinin (FV panel) çıkış karakteristiğine benzeyen ve gerçekçi verileri verebilen yardımcı bir ekipmana ihtiyaçları vardır. Bu ekipmana literatürde FV simülör adı verilmektedir. Bu çalışmada, FV panellerin laboratuvar ortamında modellenmesi için geliştirilen yeni bir FV simülör yapısı önerilmiştir. Önerilen FV simülör seri bağlı kaskat modüllerden meydana gelmektedir. FV simülörün en belirgin özelliği modül sayısının kolaylıkla artırılabilmesidir. Böylece FV simülörün çıkış geriliminin seviye sayısı artmaktadır. Bu özellik sayesinde FV simülörün I-V eğrisi, modellenmek istenen gerçek FV panelin I-V eğrisine daha çok benzemektedir. Önerilen yapının performansını göstermek amacıyla bir simülasyon çalışması yapılmıştır. Simülasyon çalışmasında, ilk önce gerçek bir FV panelin I-V verileri simülasyon programına yüklenmiştir. Gerçek I-V verileri kullanılarak FV simülör için gerekli anahtarlama sinyalleri simülasyon programında oluşturulmuştur. 5 ve 6 modüllü durum için FV simülörün I-V ve P-V eğrileri elde edilmiş ve gerçek FV panelin eğrileri ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca farklı güneş ışınımları ve parçalı gölgelenme durumları için de I-V ve P-V eğrileri elde edilmiş ve sonuçları verilmiştir. Modül sayısı arttıkça gerçek FV panel ile önerilen FV simülörün I-V ve P-V eğrileri birbirine çok yakın çıkmaktadır. Önerilen yapının FV simülör olarak kullanılması oldukça uygundur. Gerek modüler yapıya sahip olması gerekse elde edilen sonuçlar dikkate alındığında, önerilen simülörün yüksek gerilim ve güç uygulamalarında kullanılmaya elverişli olduğu görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: FV simülör, fotovoltaik simülör, I-V eğrisi, P-V eğrisi, parçalı gölgelenme

Development of a new PV simulator structure for modelling PV arrays

ABSTRACT

Current (I) - voltage (V) and power (P) – voltage (V) characteristics of Photovoltaic (PV) systems using solar cell or array depend on weather conditions. In order to test MPP trackers or MPPT algorithms in repeatable laboratory conditions, researchers need equipment that gives a realistic data similar to output

* Sorumlu Yazar / Corresponding Author

¹ Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, Kocaeli - ebeser@kocaeli.edu.tr

characteristic of solar cell or array (PV panel). This equipment is defined as a PV simulator in the literature. In this study, a new PV simulator structure is proposed for modelling PV panels in laboratory environment. The proposed PV simulator basically consists of series connected cascaded modules. The significant feature of the PV simulator is being suitable for increasing the module number easily. Thus the level number of the output voltage increases in the simulator. Due to this feature, I-V curve of the simulator quite resembles the I-V curve of PV panel desired to be modelled. In order to show the performance of the proposed structure, a simulation study was carried out. First, I-V data of a real PV panel was loaded to the simulation program. The necessary switching signals were generated in the simulation program for PV simulator by using an actual I-V data. I-V and P-V curves were obtained for 5 and 6 module condition and results were compared to the curves of the sample PV panel. I-V and P-V curves were also obtained for different solar irradiance values and partial shaded conditions. By increase of the module number I-V and P-V curves of the PV simulator and sample PV panel quite resemble each other. The proposed structure is suitable for operating as a PV simulator. Both the simulator has a modular structure and the results are considered, it is seen that the proposed simulator is convenient for using at high voltage and power applications.

Keywords: PV simulator, photovoltaic simulator, I-V curve, P-V curve, partial shaded

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Son yıllarda, fosil enerji gibi klasik enerji kaynaklarının miktarının azaldığı ve yakın gelecekte biteceği bilimsel çevreler tarafından söylenmektedir [1]. Yenilenebilir enerji kaynakları, sanayileşmeye bağlı olarak oluşan yüksek enerji ihtiyacı ve fosil yakıtlarının miktarının azalması ile birlikte dikkat çeken bir konu haline gelmiştir [2]. Tüm yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde; sessiz, temiz ve güneş var olduğu sürece kullanılabilir tükenmez bir kaynak olduğu için fotovoltaik enerji son zamanlarda ilgi çekici bir konu haline gelmiştir [1]. Ek olarak kurulum maliyetinin düşük olması ve işletme maliyetinin de oldukça düşük olması sebebiyle FV sistemlerine olan ilgi gün geçtikçe artmaktadır [3].

Güneş hücresi veya dizisi kullanan fotovoltaik sistemlerin çıkış karakteristikleri (I-V karakteristiği) hava koşullarına bağlıdır [1, 4]. Hava koşulları her an değişken ve kontrol edilemez olduğundan araştırmacılar, önerdikleri maksimum güç izleme algoritmalarının kalitesini doğrulamak için kullandıkları gerçek FV panel ile her zaman aynı I-V karakteristiği bulamayabilirler [5]. Dolayısıyla araştırmacıların, tekrarlanabilen laboratuvar koşullarında maksimum güç izleyici veya izleyici algoritmalarının performanslarını tespit edebilmeleri amacıyla güneş hücresinin çıkış karakteristiğine benzeyen ve gerçekçi verileri verebilen yardımcı bir ekipmana ihtiyaçları vardır [6, 7]. Bu ekipman sayesinde araştırmacılar deneysel ortamda maksimum güç izleyici veya

izleyici algoritmalarını test edebilir ve benzer şartlar için sonuçları karşılaştırabilirler. FV simülatörler, güç elektroniği elemanları kullanılarak gerçekleştirilen ve bir FV hücresi veya dizisinin I-V eğrisini izleyebilen cihazdır. Diğer bir deyişle FV simülatörler, akım kontrollü gerilim kaynağıdır. Ayrıca, FV simülatörler, gerçek FV panelin farklı sıcaklık, farklı ışımaya koşulları ve hatta parçalı gölgelenme durumlarına ait I-V karakteristiğini, deneysel ortamda elde edebilir. Ek olarak bu yapılar, laboratuvar ortamında yılın herhangi bir zamanı ve her türlü hava koşullarında kullanılabilir. Böylece araştırmacılar, maksimum güç izleyicilerini veya FV sistemli şebekeye bağlı eviricilerini hava koşullarına bağlı olmadan FV simülatör ile test edebilirler [8].

Dijital veya analog teknolojiyi kullanarak FV simülatör geliştirmenin birkaç yolu vardır. Bunlar; FV hücrenin veya foto diyodun çıkış akım veya gerilimini yükseltmek, sabit akım kaynağı, diyot ve direnç içeren FV eşdeğer devresini oluşturmak, FV hücrenin I-V karakteristiğini gerçekleyebilen, mikroişlemci / mikrodenetleyici veya analog devre ile kontrol edilebilen anahtarlamalı güç dönüştürücü kullanmak şeklinde sıralanabilir. Dijital teknolojinin hızlı ilerlemesinden dolayı üçüncü yöntem literatürde sık rastlanmaktadır [8]. Yapılan literatür araştırmasında, LLC rezonant DA/DA dönüştürücü [1, 3, 5], DA/DA düşürücü tip dönüştürücü [2, 4, 7, 8, 9], sıfır gerilim anahtarlamalı tam köprü tip dönüştürücü [6], iki kademeli senkron DA/DA dönüştürücü [10], yapısında iki yönlü dönüştürücü ve DGA gerilim kaynaklı doğrultucu olan iki kademeli dönüştürücü [11] ve DA/DA düşürücü-yükseltici

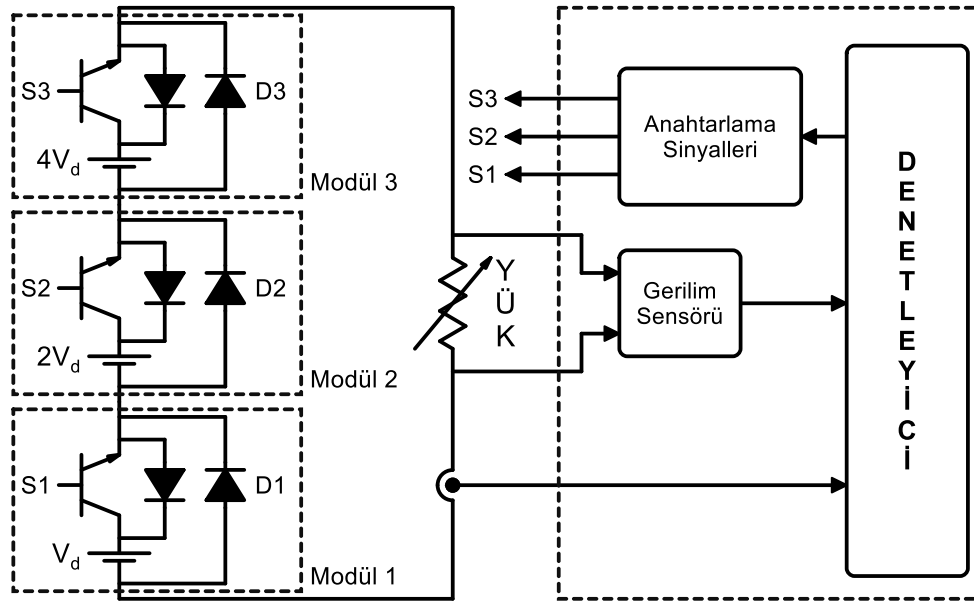
tip dönüştürücü [12] gibi yapıların FV simülatör elde edilmesinde kullanıldığı görülmüştür. Önerilen FV simülatör yapısı literatürde var olan yapıların aksine modüler bir yapıya sahiptir. Modüler yapısı sayesinde yüksek gerilimli ve yüksek güçlü uygulamalarda kullanılmaya uygundur. Ayrıca yapısı çok esnek olup tetiklemelerin elde edilmesi ve kontrolü kolaydır. Geliştirilen simülatör yapısı literatüre özgünlük açısından bir katkı sağlayacaktır.

Bu çalışmada; gerçek bir FV panele ait I-V ve P-V eğrilerini modellemek için bir FV simülatör yapısı önerilmiştir. Yapıdaki güç dönüştürücü kaskat bağlı modüllerden oluşmakta ve çok seviyeli gerilim dalga şekli üretmektedir. Kaskat modüllerin sayısı artırıldığında üretilen gerilimin seviye sayısı da artmaktadır. Önerilen FV simülatör yapısı, Bölüm 2'de detaylı olarak açıklanmıştır. Önerilen simülatörün performansını

göstermek için bir simülasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Bölüm 3'te simülasyon sonuçları verilmiş ve gerçek bir FV panele ait veriler ile karşılaştırılmıştır. Son olarak tüm çalışmanın sonuçları Bölüm 4'te değerlendirilmiştir.

2. ÖNERİLEN FV SİMÜLATÖR YAPISI (PROPOSED PV SIMULATOR STRUCTURE)

Önerilen FV simülatörün temel yapısı Şekil 1'de görülmektedir. Simülatör temel olarak birbirine benzer modüllerin kaskat bir şekilde seri bağlanmasından meydana gelmektedir. Modüller bir yarıiletken anahtarlama elemanı, bir diyot ve bir bağımsız doğru akım kaynağından oluşmaktadır.



Şekil 1. Önerilen FV simülatörün temel yapısı (The basic structure of proposed PV simulator)

FV simülatörde modül sayısı arttıkça üretilen gerilimin basamak sayısı (s) üstel olarak artmaktadır. Modül sayısı ne kadar fazla olursa, bir başka deyişle gerilimin basamak sayısı ne kadar çok olursa simülatörün I-V eğrisi modellenmek istenen FV panelin I-V eğrisine o kadar yakın olmaktadır.

Simülatör yapısında modül sayısına (m), bağlı olarak basamak sayısı (s) değişmektedir. Denklem (1)'de verilen formül yardımıyla modül sayısına bağlı olarak simülatörün basamak sayısı kolaylıkla bulunabilmektedir.

$$s = 2^m \quad (1)$$

Modül sayısına bağlı olarak hesaplanan gerilimin basamak sayısı, o modül sayısı için elde edilebilecek maksimum basamak sayısıdır. Şekil 1'de üç adet modülü bulunan 8 seviyeli FV simülatör yapısı verilmiştir. FV simülatör yapısından da görüldüğü gibi modüller birbirine kaskat seri bağlanarak sistem kolaylıkla genişleyebilmekte ve gerilimin basamak sayısı artırılabilir.

Simülatör çıkış geriliminin basamak sayısı ve çıkış geriliminin alabileceği maksimum değer bilindiği durumda birinci modülde kullanılacak kaynağın gerilimi (V_d) Denklem (2) kullanılarak

$$V_d = \frac{V_{max}}{s-1} \quad (2)$$

şeklinde hesaplanabilir. Birinci modülden sonra bağlanacak her modülden sonra kullanılacak gerilim kaynağının değeri bir önceki modül geriliminin 2 katı olacaktır.

Basamak sayısına bağlı olarak kullanılacak modül sayısı (m), Denklem (3) kullanılarak bulunabilir.

$$m = \log_2(s) \quad (3)$$

Her bir modülden bulunan kaynağın gerilimi ise $2^{(k-1)}V_d$ formülü kullanılarak elde edilmektedir. Burada k modül numarası olup

$$k = 1,2,3, \dots, m \quad (4)$$

şeklinde tanımlanmaktadır.

Önerilen simülatör prensip olarak akım kontrollü gerilim kaynağı gibi çalışmaktadır. Başka bir ifadeyle gerçek FV panellerde olduğu gibi simülatörün çıkış gerilimi içinden geçen akıma göre değişmektedir. Ancak simülatörün çıkış gerilimi basamaklı bir gerilime benzemektedir.

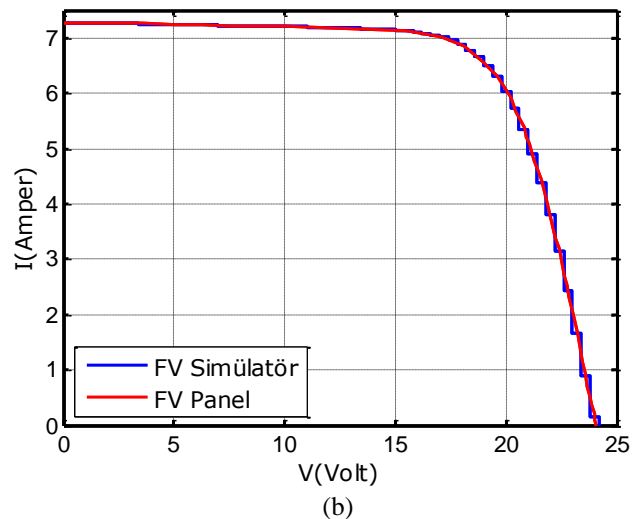
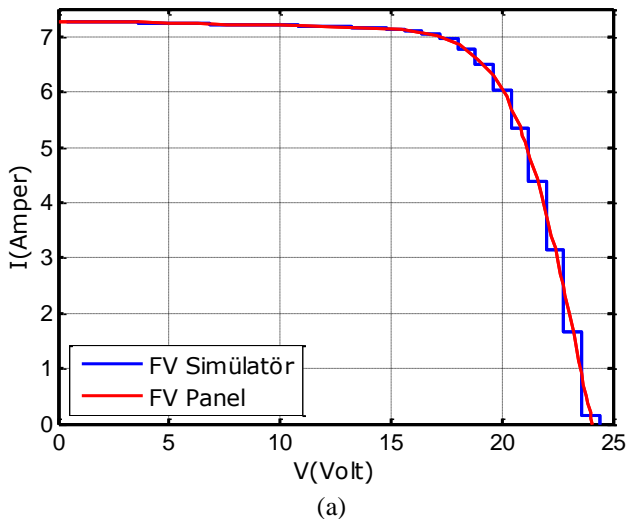
Sistemi çalıştırmadan önce ilk olarak modellenecek FV panelin I-V eğrisi verileri mikrodenetleyicinin içerisine yüklenmektedir. Daha sonra sistem çalıştırıldığında Şekil 1'deki yapıdan görüldüğü gibi simülatörün çıkış akımı sensör yardımıyla ölçülmektedir. Ölçülen bu değer mikrodenetleyici içinde bulunan analog dijital

dönüştürücü (ADC) tarafından okunmaktadır. Mikrodenetleyici içerisinde yer alan I-V eğrisi baz alınarak, okunan akım değerine karşılık gelen uygun gerilim değerini üretmek için tetikleme sinyalleri elde edilmektedir. Elde edilen tetikleme sinyalleri yarıiletken anahtarlama elemanlarına uygulandığında olması gereken gerilim değeri simülatör çıkışında oluşmaktadır.

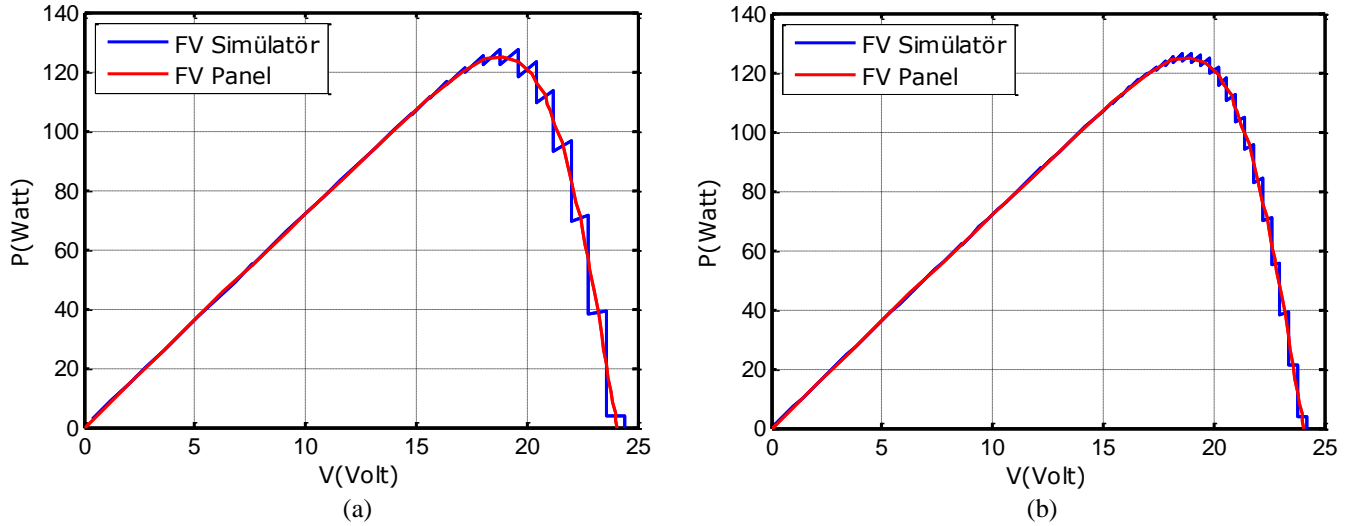
3. ÖNERİLEN FV SİMÜLATÖRÜN SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI (SIMULATION STUDY OF PROPOSED SIMULATOR)

Bu çalışmada Shüco S-125-SP FV panelin gerçek I-V değerleri kullanılarak simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. İlk olarak çalışmada kullanılan FV panelin I-V eğrisi verileri simülasyon programında oluşturulmuştur. Modül sayısına bağlı olarak V_d gerilimi hesaplanmış ve modüllerdeki doğru gerilim kaynakları bu değere göre ayarlanmıştır. FV panelin I-V eğrisindeki akım değerine karşılık simülatör çıkışında oluşması gereken gerilimi üretebilmek için tetikleme sinyalleri oluşturulmuştur.

Önerilen simülatörde; $1000W/m^2$ güneş ışınımı altında, 5 ve 6 modül kullanılarak gerilimin 32 ve 64 basamaklı olduğu durum için I-V eğrileri elde edilmiştir. Şekil 2' de bu duruma ait simülasyon sonuçları görülmektedir.



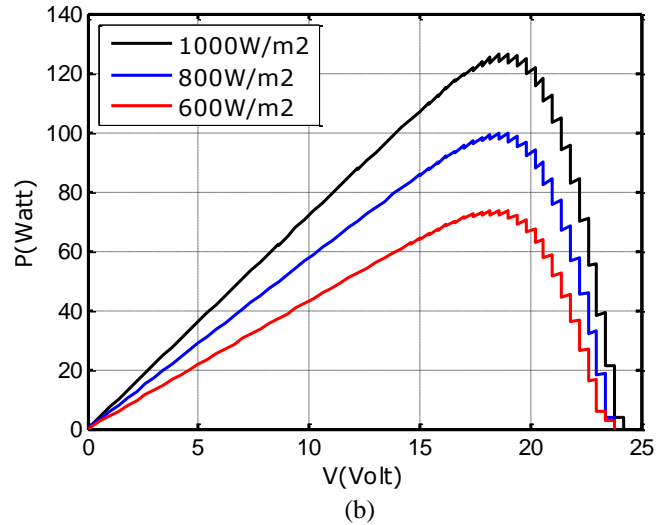
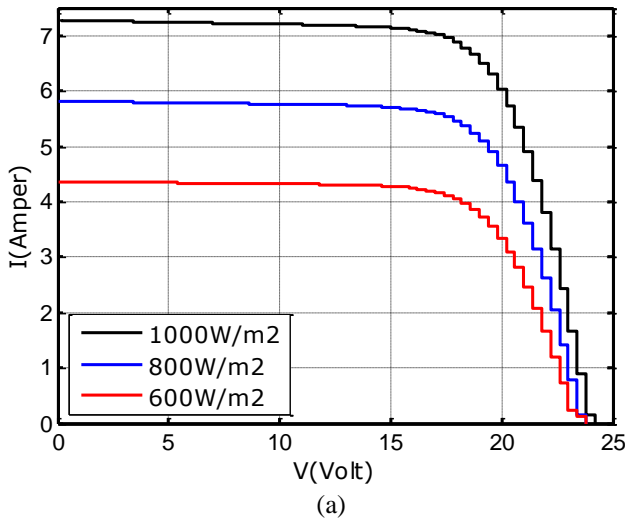
Şekil 2. Farklı modül sayıları için FV simülatörde elde edilen I-V eğrilerinin simülasyon sonuçları
a) 5 modül durumu b) 6 modül durumu
(Simulation results of I-V curves generated in the PV simulator for different module number
a) 5 modules b) 6 modules)



Şekil 3. Farklı modül sayıları için FV simülatörde elde edilen P-V eğrilerinin simülasyon sonuçları
a) 5 modül durumu b) 6 modül durumu
(Simulation results of P-V curves generated in the PV simulator for different module number
a) 5 modules b) 6 modules)

Simülasyon çalışmalarında, I-V eğrilerinin yanı sıra FV panelin P-V eğrileri de elde edilmiştir. Şekil 3'te $1000\text{W}/\text{m}^2$ güneş ışınımı altında, 5 ve 6 modül durumu için FV simülatörde elde edilen P-V eğrileri görülmektedir.

Önerilen simülatörde, modül sayısı arttıkça çıkış geriliminin basamak sayısı üstel olarak artmaktadır. Şekil 2 ve Şekil 3'ten görüldüğü gibi basamak sayısı arttıkça da simülatör I-V ve P-V eğrileri modeli oluşturulan FV panelin gerçek eğrilerine daha çok benzemektedir.

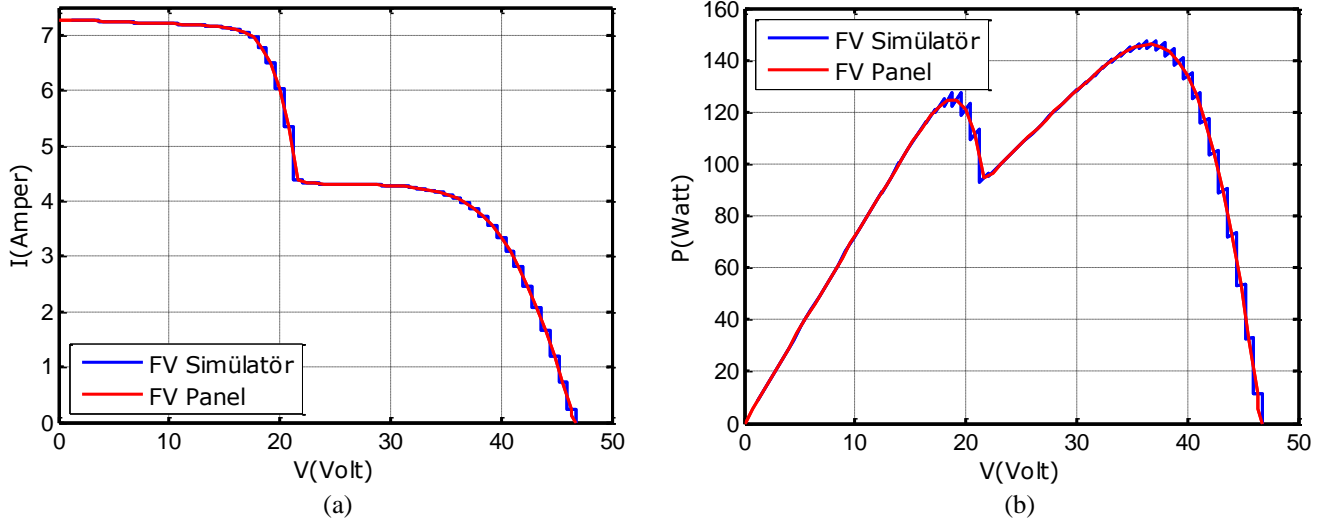


Şekil 4. 6 modüllü FV simülatöre ait farklı güneş ışırma durumları için elde edilen simülasyon sonuçları
a) I-V eğrileri b) P-V eğrileri
(Simulation results of PV simulator having 6 modules for different solar irradiance values
a) I-V curves b) P-V curves)

Simülasyon çalışmasında farklı ışırma değerleri için de I-V ve P-V eğrileri elde edilmiştir. Şekil 4'te 6 modüllü FV simülatörde farklı ışırma değerleri için elde edilen eğriler görülmektedir.

Bu çalışmada son olarak önerilen FV simülatör ile parçalı gölgelenme durumunun da modellenebileceğini göstermek amacıyla parçalı gölgelenme durumu için de bir simülasyon çalışması yapılmıştır.

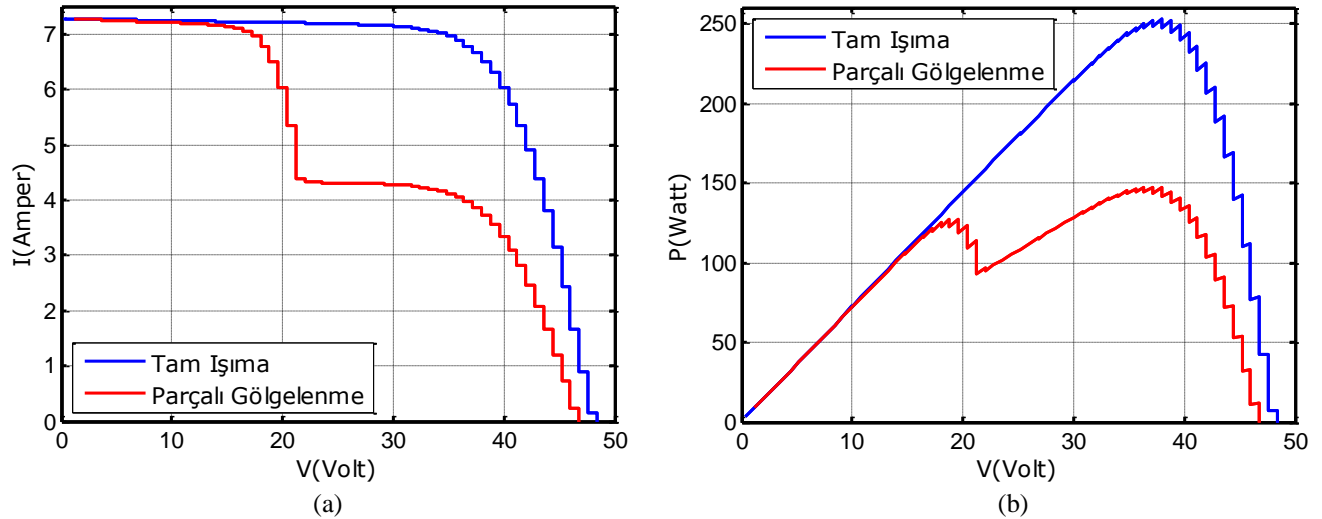
Bu amaçla; aynı özelliklere sahip iki Shüco S-125-SP FV panelin seri bağlanması halinde ve birinci panelin $1000\text{W}/\text{m}^2$, ikinci panelin $600\text{W}/\text{m}^2$ ışırma altında olması durumu düşünülerek bu durum için I-V ve P-V eğrileri elde edilmiştir. Şekil 5'te yukarıda anlatılan parçalı gölgelenme durumu için 6 modüllü FV simülatörde elde edilen eğriler görülmektedir.



Şekil 5. 6 modüllü FV simülatörde, parçalı gölgeleme durumuna ait simülasyon sonuçları
a) I-V eğrileri b) P-V eğrileri
(Simulation results of PV simulator having 6 modules for partial shaded condition
a) I-V curves b) P-V curves)

Ayrıca parçalı gölgeleme durumunun daha iyi anlaşılması açısından seri bağlı iki panelin her ikisinin de 1000W/m^2 ışımada olduğu durum için de simülasyon çalışması yapılmış ve bu çalışmaya ait I-V ve P-V eğrileri elde edilmiştir. Seri bağlı iki panelin her ikisinin de 1000W/m^2 ışımada olduğu durumu gösteren I-V eğrisi Şekil 6 (a)'da verilmiştir. Ek olarak karşılaştırma

olması açısından, panellerden birinin 600W/m^2 ışımada olması durumunda elde edilen I-V eğrisi de Şekil 6 (a)'da aynı eksen takımında görülmektedir. Aynı durumlar için elde edilen P-V eğrileri de Şekil 6 (b)'de verilmiştir.



Şekil 6. 6 modüllü FV simülatörde, tam ışımada ve parçalı gölgeleme durumunda elde edilen simülasyon sonuçları
a) I-V eğrileri b) P-V eğrileri
(Simulation results of PV simulator having 6 modules for full radiation and partial shaded condition
a) I-V curves b) P-V curves)

Simülasyon sonuçları önerilen FV simülatör yapısı ile parçalı gölgeleme durumlarının da laboratuvar ortamında oluşturabildiğini göstermektedir. Tüm simülasyon sonuçları değerlendirildiğinde geliştirilen FV simülatör, araştırmacıların tasarladıkları maksimum güç izleme algoritmalarını veya maksimum güç izleyici devrelerini laboratuvar ortamında kolaylıkla,

gerçeğe yakın olarak ve tekrarlanabilir koşullarda test edebilmesine imkan sağlamaktadır.

4. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Bu çalışmada, FV panellerin modellenmesi için geliştirilen yeni bir simülatör yapısı önerilmiştir. Önerilen yapı ayrıntılı olarak tanıtılmış,

simülasyon çalışması gerçekleştirilmiş ve simülasyon sonuçları modellenen gerçek FV panelin verileri ile karşılaştırılmıştır. Önerilen yapı çok seviyeli bir yapı olup FV simülatör konusunda literatüre yeni bir yaklaşım kazandırmıştır. Önerilen simülatörün yapısı çok esnek olup tetiklemelerin elde edilmesi ve kontrolü kolaydır. Modül sayısı artırılarak sistemin hassasiyeti artırılmakta ve sonuçlar modellenen gerçek FV panel eğrilerine daha çok benzemektedir. Ayrıca modül sayısı artırıldığı zaman gerilim seviyesi ihtiyaca bağlı olarak yükseltilebilmektedir. Bu sayede önerilen sistem yüksek gerilimli FV panel modellenmesinin gerektiği uygulamalarda rahatlıkla kullanılabilir. Yüksek gerilimli uygulamalarda kullanılabilen bir yapı olduğu için şebeke senkronizasyonlu FV panel çalışmalarında önerilen sistem tercih edilebilir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] C. H. Chang, E. C. Chang and E. L. Cheng, "A High-Efficiency Solar Array Simulator Implemented by an LLC Resonant DC-DC Converter," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 6, pp. 3039-3046, 2013
- [2] H. Lee, M. J. Lee, S. N. Lee, H. Lee, H. Nam and S. Park, "Development of Photovoltaic Simulator based on DC-DC Converter," in *International Telecommunications Energy Conference - INTELEC*, 2009.
- [3] A. Koran, K. Sano, R. Y. Kim and J. S. Lai, "Design of a Photovoltaic Simulator with a Novel Reference Signal Generator and Two-Stage LC Output Filter," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 25, no. 5, pp. 1331-1338, 2010.
- [4] Z. G. Piao, S. J. Gong, Y. H. An and G. B. Cho, "A Study on the PV Simulator using Equivalent Circuit Model and Look-up Table Hybrid Method," in *International Conference on Electrical Machines and Systems*, 2013.
- [5] C. H. Chang, C. A. Cheng and H. L. Cheng, "Modeling and Design of the LLC Resonant Converter Used as a Solar-Array Simulator," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 2, no. 4, pp. 833-841, 2014.
- [6] J. P. Lee, B. D. Min, T. Kim and J. Kim, "Development of a Photovoltaic Simulator with Novel Simulation Method of Photovoltaic Characteristics," in *31st International Telecommunications Energy Conference - INTELEC*, 2009.
- [7] H. Qi, Y. Bi and Y. Wu, "Development of Photovoltaic Array Simulator Based on Buck Converter," in *International Conference on Information Science, Electronics and Electrical Engineering - ISEEE*, 2014.
- [8] Y. Li, T. Lee, F. Z. Peng and D. Liu, "A Hybrid Control Strategy for Photovoltaic Simulator," in *Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC*, 2009.
- [9] P. Vongkoon and P. Liutanakul, "Digital R-S-T Controller for Current Loop Control of DC/DC Buck Converter: A Photovoltaic (PV) Array Simulator under Partial Shading Condition," in *9th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology - ECTI-CON*, 2012.
- [10] J. Zhao and Z. W. Kimball, "A Digitally Implemented Photovoltaic Simulator with a Double Current Mode Controller," in *Twenty-Seventh Annual IEEE Applied Power Electronics and Exposition - APEC*, 2012.
- [11] A. F. Cupertino, G. V. Santos, H. A. Pereira, S. Silva and V. Mendes, "Modeling and Control of a Flexible Photovoltaic Array Simulator," in *IEEE 24th International Symposium on Industrial Electronics - ISIE*, 2015.
- [12] D. D. C. Lu and Q. Y. Nguyen, "A photovoltaic panel emulator using a buck-boost DC/DC converter and a low cost micro-controller," *Solar Energy*, pp. 1477-1484, 2012.