



Investigation of the Effect of Lightning Surge Voltages on Photovoltaic Systems

Şafak Kölemenoglu^{1,a}, Mustafa Şeker^{2,b*}

¹ TEDAŞ 8. Bölge Müdürlüğü, Kümbet Mahallesi 8. sk.no. 22 Merkez-SİVAS

² Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği, 58140 Merkez/SİVAS

*Corresponding author

Research Article

History

Received: 22/12/2023
Accepted: 02/01/2024

ABSTRACT

The need for renewable energy in electricity generation is increasing day by day. Solar energy has the greatest potential among renewable energy sources. Lightning overvoltages occurring in electrical systems cause permanent and instantaneous interruptions in the system as well as the failure of system equipment. In this study, a 100 kW photovoltaic system is modeled using Matlab/Simulink and transient events in the PV system in case of a lightning strike on the inverter output are investigated. A 1.2/50 lightning pulse is modeled using the Heidler function to model the lightning waveform. Perturb & Observe optimization algorithm is used to determine the maximum power point in the system. A boost converter structure was designed as the DC-DC converter structure and the AC output of the system was obtained with a bridge inverter. Simulation results show that lightning strikes can cause serious damage to the equipment used in PV systems. Therefore, in order to protect PV systems from the effects of lightning strikes and to ensure system safety, it is recommended to provide surge arrester protection at the appropriate location in all applications.

Keywords: PV systems, Lightning over voltage, DC-DC converter, Inverter

Yıldırım Aşırı Gerilimlerinin Fotovoltaik Sistemler Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi

ÖZ

Elektrik üretiminde yenilenebilir enerjiye duyulan gereksinim her geçen gün artmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde de en büyük potansiyeli güneş enerjisi oluşturmaktadır. Elektriksel sistemlerde meydana gelen yıldırım aşırı gerilimleri sistemde kalıcı ve anlık kesintilere sebep olduğu gibi sistem ekipmanlarının bozulmasına da neden olmaktadır. Bu çalışmada 100 kW gücünde fotovoltaik sistem Matlab/Simulink kullanılarak modellenmiştir ve PV sistemde invertör çıkışına yıldırım düşmesi durumundaki geçici olaylar incelenmiştir. Yıldırım dalga formunun modellenmesinde Heidler fonksiyonu kullanılarak 1.2/50'lik yıldırım darbesi modellenmiştir. Sistemde maksimum güç noktasının belirlenmesinde Değiştir&Gözlemler(Perturb&Observe) optimizasyon algoritması kullanılmıştır. DC-DC konvertör yapısı olarak boost konvertör yapısı tasarlanmış ve köprü evirici invertör ile sistemin AC çıkışı elde edilmiştir. Benzetim sonuçları yıldırım çarpmalarının PV sistemlerde kullanılan ekipmanlara ciddi hasarlar verebileceğini göstermektedir. Bu nedenle PV sistemlerin yıldırım çarpmalarının neden olduğu etkilerinden korunması ve sistem güvenliğini sağlamak için uygun lokasyonda parafudur korumasının tüm uygulamalarda kullanılması önerilmektedir.

Anahtar Kelimeler: PV sistemler, Yıldırım aşırı gerilimler, DC-DC konvertör, İnvörtör

Copyright



This work is licensed under
Creative Commons Attribution 4.0
International License

^a skolemenoglu@gmail.com

^b 0000-0002-0156-1307

mustafaseker@cumhuriyet.edu.tr

0000-0002-3793-8786

How to Cite: Kölemenoglu Ş, Şeker M (2024) Investigation of the Effect of Lightning Surge Voltages on Photovoltaic Systems, Journal of Engineering Faculty, 2(1): 9-15.

Giriş

Nüfus artışı ve teknolojik gelişmelere yönelik talepler enerji arzında büyük bir artışa yol açmaktadır. Günümüzün en önemli probleminden biri olan küresel ısınmaya sebep olan fosil yakıtların çevreye verdiği zarar düşünüldüğünde bu sorunu çözmek ve daha çevreci olarak enerji üretebilmek için ülkeler yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmektedir[1]. Diğer yenilenebilir enerji kaynakları ile karşılaştırıldığında, güneş enerjisi sonsuz bir kaynak olması, doğal, ekolojik çevreye uyumlu, bakım maliyetlerinin düşük ve ekonomik olması gibi birçok avantajı nedeni ile öne çıkmaktadır[2]. Gelecekte güneş enerjisi, dünya üzerinde ihtiyaç duyulan enerji ihtiyacını tek başına karşılama potansiyeline sahiptir. 2050 yılına kadar yenilenebilir enerjinin tüm arz değerinin yaklaşık %50 sinden fazlasını üretebileceğini öngörülmektedir[3].

Yıldırımlar; atmosferik olaylara bağlı olarak ortaya çıkan doğa olayıdır. Yıldırım aşırı gerilimlerinin iletim ve dağıtım sistemlerinde karşılaşılan önemli elektrik kesintileri ve arızalara yol açar. Günümüzde elektriksel sistemlerde hassas yüklerin kullanılması artması nedeniyle sistemde oluşacak herhangi bir kesinti, kalıcı arızalar ele alınması gereken önemli bir konu haline gelmiştir. Yıldırımlarda bu arızaların oluşmasında önemli bir istatistiğe sahip olması nedeniyle incelenmesi gereken önemli bir konu haline gelmiştir. Zira yıldırımlar elektrik ve otomasyon sistemlerinde çok yüksek maliyet içeren arızalara sebep olabilirler[4], [5].

Fotovoltaik (PV) sistemler çatı veya güneş tarlası olarak adlandırılan açık alanlara kurulurlar. PV sistemler şebekeye bağlı çalıştırılabildikleri gibi şebekeden bağımsız olarak da çalıştırılabilirler. Kurulum şekli nasıl olursa olsun sistemin kesintiye uğramadan çalışması arzu edilir ve sistemde oluşabilecek arızalarından kaçınmak için koruma ekipmanlarına ihtiyaç duyulur.

PV sistemin doğrudan veya dolaylı olarak yıldırım darbesine maruz kalması sistemin tamamına zarar verebilir. PV sistemin doğrudan yıldırım darbesine maruz kalması invertörlerin, kabloların ve sigortaların tahrip olmasına yol açabilir. Yıldırım yoğunluğunun yüksek

olduğu bir alanda PV sistemin kurulmasında paneller ve diğer bileşenlerde yıldırım darbesinden etkilenir[6]. Bir PV sisteme yıldırım çarpması durumu ve oluşan aşırı gerilimin panel üzerindeki etkisi sırası ile Şekil 1 ve Şekil 2'de gösterilmiştir.

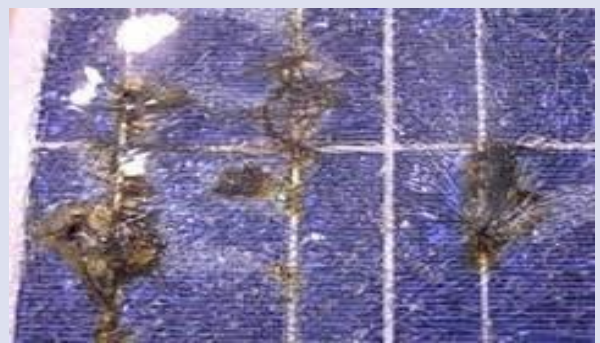
Şekillerden de görülebileceği gibi PV sistemin ömrünü belirlemede yıldırımdan korunma sisteminin kullanılması oldukça önemlidir[7]. PV modüllerin yıldırım darbesine maruz kalması bir çok araştırmacı tarafından inceleme konusu olmuştur.

Naxakis ve çalışma arkadaşları, yıldırım darbesi altında mono kristal PV modülün performansını değerlendirmiştir. Gerçekleştirmiş olduğu incelemelerde 144 kV yıldırım darbesinde PV modülün tamamen hasar gördüğü ve elektriksel özelliklerinin bozulduğunu belirlemişlerdir. Ardından 12 kV ve 35 kV'a kadar IEC 61730-2'ye göre yapılan testlerde, PV modüllerde belirgin bir bozulma olmadığını belirlemişlerdir[8]. Jiang ve Gryzbowski'nin [9] ise PV modülünün mümkün olan en yüksek güç çıkışının yıldırım darbe gerilimleriyle üstel olarak azaldığını bulunmuştur. Düşük yıldırım darbe gerilimi seviyelerinde bile, sonuçlar PV modülünün elektriksel olarak bozulduğunu ancak 1000V gerilim için modüllerin herhangi bir anormal hasara sahip olmadığını göstermiştir[9]. Sekioka[10] ise yıldırım çarpmalarında çerçevesel PV panellerin yüzeylerinde yük oluştuğunu ve PV panellerin korunmasının dikkate alınmasını önermiştir. Hem Belik[11] hem de Abdul Rahim ve diğerleri[12] indüklenen voltaj oluşumunun dolaylı yıldırımdan kaynaklandığını ve kablolar ile PV modülleri arasında yüksek voltajlı bir kıvılcıma neden olduğunu ve böylece PV paneline ciddi şekilde zarar verdiğini vurgulamıştır.

Bu çalışmada şebekeden bağımsız olarak çalışan bir PV sisteme yıldırım düşmesi durumunda oluşabilecek aşırı gerilimler Matlab/Simulink kullanılarak incelenmiştir. PV sistemin modellenmesinde tek diyot devre modeli kullanılmıştır. Yıldırım etkisini değerlendirmede 1.2/50 µs'lik yıldırım akımı dalga formu Heidler fonksiyonu kullanılarak modellenmiştir.



Resim 1. Yıldırımın PV santral üzerine çarpması
Figure 1. Lightning strikes PV power plant



Resim 2. Yıldırım darbesinin PV modül üzerindeki etkisi.
Figure 2. Impact of lightning pulse on PV module.

Metodoloji

PV dizilerinin Modellenmesi

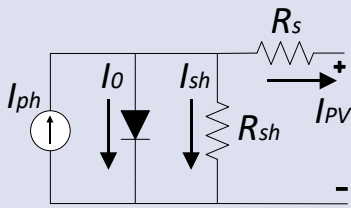
Çıkış voltajı V ve PV hücre akımı I olmak üzere PV hücrelerin modellenmesinde kullanılan tek diyotlu eşdeğer devre modeli Şekil 3'de gösterilmiştir. Şekil 3'ten görüldüğü gibi PV hücrenin tek diyotlu modeli, bir şönt direnci R_{sh} ve bir seri direnç R_s 'nin yanı sıra, P-N bağlantısını taklit eden bir diyot ile bağlı bir kaynak foton akımı I_{ph} içerir. Bu nedenle, PV akımı denklem (1) ile ifadesi ile tanımlanabilir. (1) denkleminde V , I_{ph} , T , K sembolleri sırası ile bias voltajı, diyot akımı, Boltzman sabiti ve mutlak sıcaklıktır [13].

$$I = I_{ph} - I_s \left\{ \exp \left(\frac{V + IR_s}{aKTn_n} \right) - 1 \right\} - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (1)$$

Maksimum Güç Noktası İzleyici

Güneş enerjisi PV modül tarafından doğrudan elektrik enerjisine dönüştürülür. Fakat PV modül bu dönüştürme işleminde birçok çevresel değişimden etkilenir. Bu çevresel değişimler içerisinde PV hücrenin maruz kaldığı solar radyasyon miktarı ve sıcaklık en belirliyi parametrelerdir [14]. Bu parametrelerin değişimine bağlı olarak PV hücre lineer olmayan çalışma karakteristiğine sahiptir. Bu nedenle PV sistemden maksimum verim elde edilebilmesi için maksimum güç noktası (MPPT) olarak adlandırılan güç noktasında sistem çalıştırılmalıdır. Uygun güç elektroniği ekipmanlarının kullanımı ve mikroişlemci tabanlı izleme algoritmaları (MPPT algoritmaları) kullanılarak PV sistemler maksimum güç noktasında çalıştırılabilir.

Bu yapı Şekil 4'de gösterildiği gibi bir DC-DC boost konvertör yapısı ve Mosfet'i tetikleyecek izleme algoritması kullanılarak gerçekleştirilebilir. Uygulanacak Duty değerine göre çıkış gerilimi ve akımı (2) ve (3) denklemleri ile tanımlanır. Bu denklemlerde; α - duty



Resim 3. PV hücrenin tek diyot eşdeğer devre modeli.
Figure 3. Single diode equivalent circuit model of a PV cell.

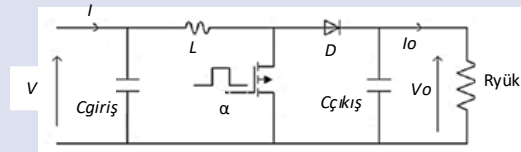
döngüsü, V dönüştürücü giriş gerilimi, V_0 ve I_0 ise sırası ile dönüştürücünün çıkış gerilimi ve çıkış akımıdır.

$$V_0 = \frac{V}{1 - \alpha} \quad (2)$$

$$I_0 = I \cdot (1 - \alpha) \quad (3)$$

Değiştir ve Gözlemle Algoritması (Perturb&Observe-PO)

Değiştir ve gözlemle algoritması (PO) PV modüllerin maksimum güç noktasının izlenmesinde yaygın olarak kullanılan bir optimizasyon algoritmasıdır. Fotovoltaik panellerin güç-gerilim (P-V) eğrisinden faydalanılarak geliştirilmiştir. PO algoritmasında PV gücü sürekli olarak izlenir [15]. İzlenen güç değerine bağlı olarak sistemin maksimum güç noktasına (MPPT) ulaşmak için panel geriliminde artırma ve azaltma yapılır. Her bir arttırım ve azaltım işleminden sonra güçteki değişim hesaplanır. Bu işlem sırasında sürekli olarak bir denetleme yapıldığından panel gücündeki değişimler küçük dalgalanmalar içerir [16] Algoritmanın çalışmasında izlenen gücün maksimum güç noktasının sağında veya solunda olması durumuna bakılır. Eğer hesaplanan güç değeri maksimum güç noktasının sağındaysa gerilim değeri artırılarak güç değerinin de artırılması sağlanır. Bu durumda şayet gerilim değeri azaltılırsa güç değeri de azalacaktır. Ters olarak izlenen güç maksimum güç noktasının sol tarafında ise gerilim değeri artırıldığında ilk durumun tersi olarak güç azalacaktır. Gerilim değeri azaltıldığında ise güç artacaktır. Böylece gerilim değişimindeki değere bağlı olarak güçteki değişim izlenir ve sonraki adımda izlenecek gerilim değerine karar verilir. Değiştir ve gözlemle algoritması için maksimum güç noktasına ulaşmada izlenen gerilim değişim kararı Çizelge 5'de verilmiştir. Algoritmanın işleyişini gösteren akış diyagramı ise Şekil 6' de sunulmuştur.

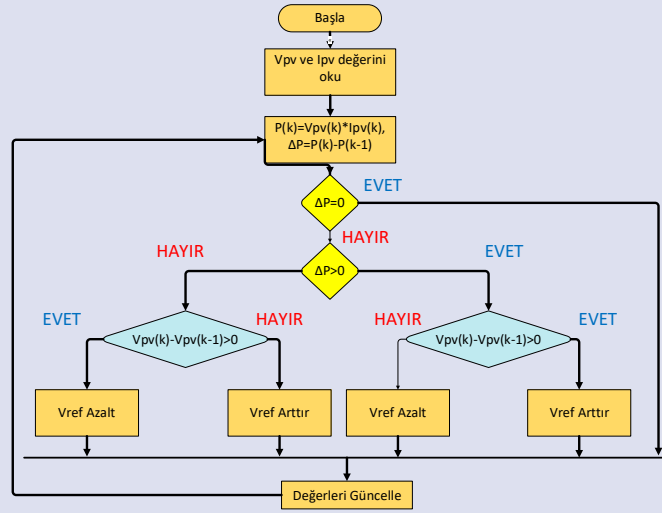


Resim 4. DC-DC Boost Dönüştürücü.
Figure 4. DC-DC Boost Converter.

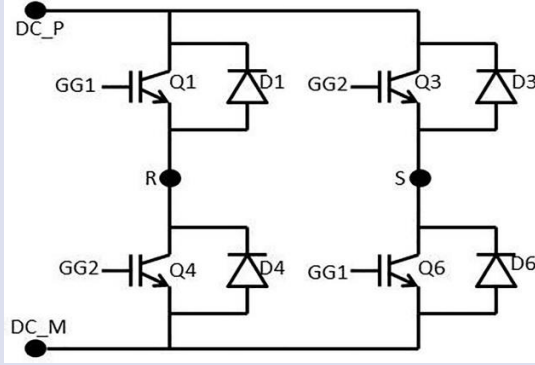
Çizelge 1. Gerilim değeri değişimi karar Çizelgesi.

Table. 1. Voltage value change decision chart.

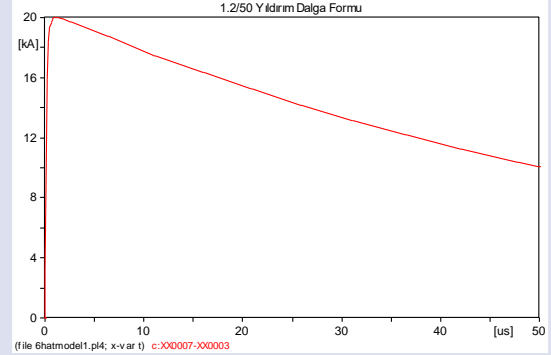
Gerilim değerindeki değişim	Güçteki değişim	Değişim yönü
Pozitif	Pozitif	Pozitif
Pozitif	Negatif	Negatif
Negatif	Pozitif	Negatif
Negatif	Negatif	Pozitif



Resim 5. Değiştir ve Gözlemler algoritması akış şeması
Figure 5. Flowchart of the Modify and Observe algorithm



Resim 6. Tek faz H köprü evirici.
Figure 6. Single phase H bridge inverter.



Resim 7. 1.2/50 μs yıldırım akımı dalga formu.
Figure 7. 1.2/50 μs lightning current waveform.

Tek Faz Evirici Modeli

Evirici, DC kaynağın şebekeye bağlandığı noktada kullanılır ve DC-AC enerji dönüşümünü sağlar[17]. Bu çalışmada verimliliğinin yüksek olmasından dolayı H-köprülü evirici kullanılmıştır[18].

Yıldırım Akımının Modellenmesi

Yıldırımdan koruma çalışmalarının yapılmasında, yıldırım akımını tanımlamada kullanılan eksponansiyel model, çift eksponansiyel model ve Heidler fonksiyonu gibi çeşitli matematiksel modeller geliştirilmiştir[19]. Heidler fonksiyonu yıldırım akımı dalga formunu tanımlama en sık kullanılan matematik fonksiyonlardan biridir ve (15) eşitliği ile ifade edilir[20][21].

$$I(t) = \frac{I_{mak}}{\eta} \cdot \frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n}{1 + \left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (4)$$

Bu ifadede, τ_1 ve τ_2 yıldırım akımının artma ve azalması durumundaki zaman sabitleri, I_{mak} akımın maksimum değeri ve η düzeltme faktörüdür. (4) ifadesinin türevi alınarak sıfıra eşitlendiğinde ve gerekli sadeleştirmeler yapıldığında düzeltme

katsayısı (5) eşitliği ile ifade edilir. Bu çalışmada kullanılan 1.2/50 μs'lik yıldırım akımı dalga formu Şekil 7'de sunulmuştur.

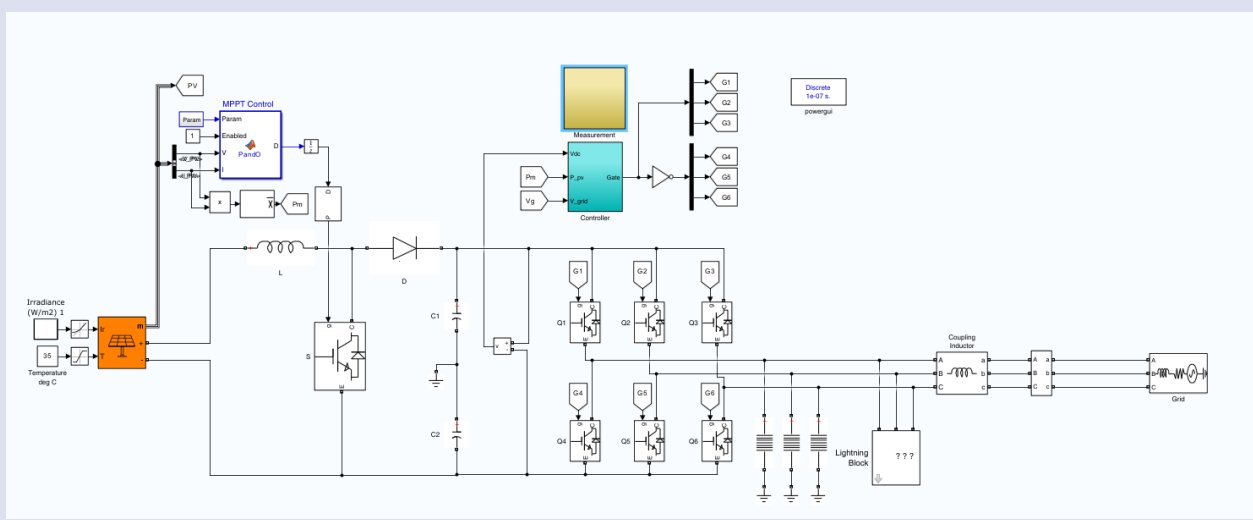
$$\eta = e^{-\frac{\tau_1}{\tau_2}} \cdot n+1 \sqrt{\frac{n \cdot \tau_2}{\tau_1}} \quad (5)$$

100 kW Şebekeye Bağlı PV Sistem Modeli ve Analiz Sonuçları

Çalışmanın bu bölümünde, Bölüm 2'de açıklanan PV hücre modeli, DC-DC konvertör "yapısı ve değiştir&gözlemler optimizasyon algoritması kullanarak tasarlanan maksimum güç izleyicisi ile invertör yapısı 100 kW'lık bir PV sistem için Matlab/Simulink kullanılarak Şekil 8'de gösterildiği gibi modellenmiştir. Modelde invertör çıkışına 1 kV parafudur tasarlanarak her bir faz için aşırı gerilimlere karşı koruma yapması amaçlanmıştır. Yıldırım akımı dalga formu olarak 1.2/50 μs'lik 10 kA genliğe sahip yıldırım akımı dalga formu kullanılmıştır. Şekil 8'de gösterildiği gibi invertör çıkışına yıldırım düşmesi durumunda DC-DC konvertörün çıkış kapasitörü üzerinde oluşan gerilim değerleri sistemdeki parafudurların devrede olduğu ve olmadığı durumlar için analiz edilerek karşılaştırılmıştır.

Sistemde kullanılan solar modüller ve diğer sisteme ilişkin olarak parameter değerleri Çizelge 2'de sunulmuştur. Sistemin 64 paralel ve 5 seri dizi yapısında tasarlanması durumunda

fotovoltaik panellerin akım-gerilim (I-V) ve güç-gerilim (P-V) karakteristikleri ise Şekil 9'da sunulmuştur.

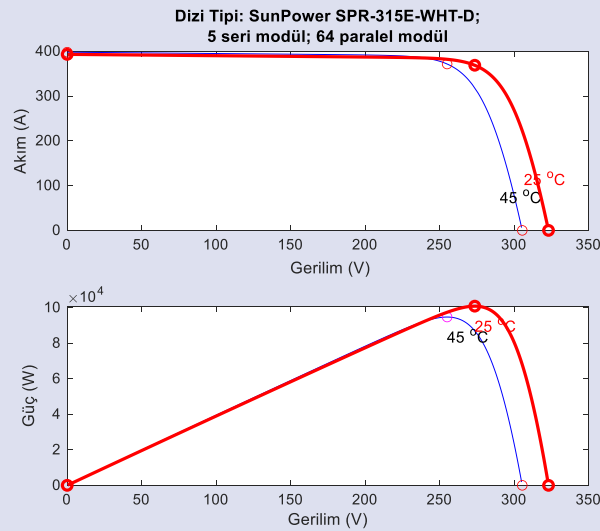


Resim 8. 100 kW PV sistem yapısı.
Figure 8. 100 kW PV system structure.

Çizelge 2. Sisteme ait temel parametreler

Table 2. Basic parameters of the system

Sistem Bileşeni	Miktarı	Özellikleri
Solar Modüller	64 paralel 5 Seri string (100 kW)	PV panel gücü=315 W
		PV string gerilimi (5 Sei panel)=323 V
		Herbir dizinin akımı= 392 A
		Tek PV hücrenin akımı=6,14 A
İnvertör	1	Tek PV hücrenin kısa devre gerilimi=64,6 V
Şebeke	1	AC güç 100 kW
		Şebeke çıkış gücü =100 kW



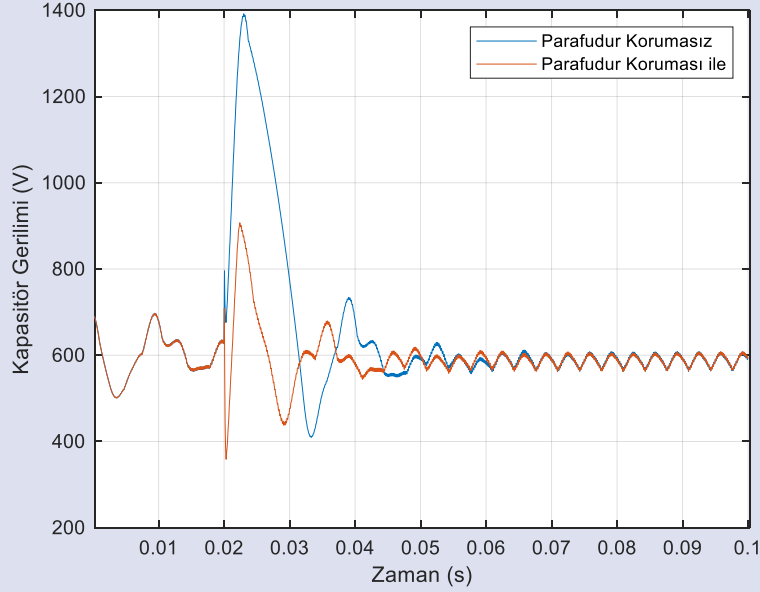
Resim 9. 64 paralel ve 5 seri dizi yapısında tasarlanması durumunda fotovoltaik panellerin akım-gerilim (I-V) ve güç-gerilim (P-V) karakteristikleri.

Figure 9. Current-voltage (I-V) and power-voltage (P-V) characteristics of photovoltaic panels when designed in 64 parallel and 5 series array structures.

Parafudur koruması kullanılması durumu ve kullanılması durumlarının incelenmesi

PV sistemde invertör çıkışında parafudur korumasının devrede olmadığı ve olduğu durumlar için DC-DC konvertör çıkışındaki kapasitörler üzerinde oluşan gerilim grafiksel olarak Şekil 10'da gösterilmiştir. 1 kV üzerindeki gerilimlerin sistemde kullanılan ekipmanlara ve PV panellere zarar verdiği bilinmektedir. Parafudur korumasının olmadığı durumlarda invertör çıkışındaki

herhangi bir noktanın yıldırım darbesine maruz kalması sonucunda oluşacak aşırı gerilimler PV panellerin ve sistem elemanlarının zarar görmesine neden olacaktır. Bu benzetim modelinde kullanılan parafudur değerleri PV sistem tasarımında kullanılan 1 kV'luk maksimum gerilim değerini bastırarak şekilde modellenmiştir. Şekil 10'dan görüldüğü üzere sistemde parafudur kullanılması sistem ekipmanlarının zarar görmemesi engelleyerek gerilimi baskılayacaktır.



Resim 10. Yıldırım aşırı geriliminin korumalı ve korumasız olarak kapasitör üzerindeki etkisi.
Figure 10. Effect of lightning overvoltage on capacitor with and without protection.

Bulgular ve Öneriler

Fotovoltaik sistemlerin kullanımı her geçen gün artmaktadır. Bu çalışmada fotovoltaik sistemlerin, yıldırım aşırı gerilimine maruz kalması durumundaki etkileri incelenmiştir. Günümüzde özellikle küçük boyutlu çatı tipi PV uygulamalarında parafudur koruması kullanılmamaktadır. Bu durum sistemin yıldırım darbesine maruz kalması halinde kısmen veya tamamen kullanılmaz hale gelmesine neden olmaktadır. Sunulan benzetim modelinde, PV sistemin modellenmesinde tek diyot devre modeli kullanılmıştır. Yıldırım etkisini değerlendirmede 1.2/50 μ s'lik yıldırım akımı dalga formu Heidler fonksiyonu kullanılarak modellenmiştir.

Elde edilen sonuçlar invertör çıkışından uygulanacak parafudur koruması ile invertör, maksimum güç izleyici ve PV paneller gibi fotovoltaik sistemi oluşturan temel bileşenlerin uygun bir şekilde korunabileceğini göstermektedir. Sunulan yaklaşım büyük güçlü PV tarlalarında kullanılmaktadır ancak üretim gücü ne olursa olsun sistemlerin devamlılığını sağlamak ve korumak adına PV ile üretim yapılan tüm tesislerde (özellikle çatı uygulamalarında) boyut fark etmeksizin parafudur

korumasının bir zorunluluk haline getirilmesi gerekmektedir.

References

- [1] A. A. Zaki Diab and H. Rezk, "Global MPPT based on flower pollination and differential evolution algorithms to mitigate partial shading in building integrated PV system," *Sol. Energy*, vol. 157, pp. 171–186, 2017, doi: 10.1016/j.solener.2017.08.024.
- [2] R. K. Akikur, R. Saidur, H. W. Ping, and K. R. Ullah, "Comparative study of stand-alone and hybrid solar energy systems suitable for off-grid rural electrification: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 27, pp. 738–752, 2013, doi: 10.1016/j.rser.2013.06.043.
- [3] M. Z. A. Ab Kadir, Y. Rafeeu, and N. M. Adam, "Prospective scenarios for the full solar energy development in Malaysia," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 14, no. 9, p. 3023, 2010, doi: 10.1016/j.rser.2010.07.062.
- [4] S. L. Wong, N. Ngadi, T. A. T. Abdullah, and I. M. Inuwa, "Recent advances of feed-in tariff in Malaysia," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 41, pp. 42–52, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2014.08.006.
- [5] A. Asuhaimi, M. Zin, S. Member, and S. P. A. Karim, "in Tenaga Nasional Berhad Malaysia," vol. 22, no. 4, pp. 2047–2056, 2007.

- [6] Y. Tu, C. Zhang, J. Hu, S. Wang, W. Sun, and H. Li, "Research on lightning overvoltages of solar arrays in a rooftop photovoltaic power system," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 94, pp. 10–15, 2013, doi: 10.1016/j.epsr.2012.06.012.
- [7] N. I. Ahmad et al., "Lightning protection on photovoltaic systems: A review on current and recommended practices," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 82, no. March, pp. 1611–1619, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.07.008.
- [8] I. Naxakis, E. Pyrgioti, V. Perraki, and E. Tselepis, "Studying the effect of the impulse voltage application on sc-Si PV modules," *Sol. Energy*, vol. 144, pp. 721–728, 2017, doi: 10.1016/j.solener.2017.01.072.
- [9] T. Jiang and S. Grzybowski, "Influence of lightning impulse voltages on power output characteristics of Photovoltaic modules," *ICHVE 2014 - 2014 Int. Conf. High Volt. Eng. Appl.*, no. 4, 2014, doi: 10.1109/ICHVE.2014.7035488.
- [10] S. Sekioka, "An experimental study of sparkover between a rod and a photovoltaic panel," *2012 31st Int. Conf. Light. Prot. ICLP 2012*, 2012, doi: 10.1109/ICLP.2012.6344268.
- [11] M. Belik, "PV panels under lightning conditions," *Proc. 2014 15th Int. Sci. Conf. Electr. Power Eng. EPE 2014*, pp. 367–370, 2014, doi: 10.1109/EPE.2014.6839446.
- [12] N. H. A. Rahim et al., "Investigation of wave propagation to PV-solar panel due to lightning induced overvoltage," *Telkomnika (Telecommunication Comput. Electron. Control.*, vol. 12, no. 1, pp. 47–52, 2014, doi: 10.12928/TELKOMNIKA.v12i1.1976.
- [13] R. Venkateswari and N. Rajasekar, "Review on parameter estimation techniques of solar photovoltaic systems," *Int. Trans. Electr. Energy Syst.*, vol. 31, no. 11, pp. 1–72, 2021, doi: 10.1002/2050-7038.13113.
- [14] K. Aygöl, M. Cikan, T. Demirdelen, and M. Tumay, "Butterfly optimization algorithm based maximum power point tracking of photovoltaic systems under partial shading condition," *Energy Sources, Part A Recover. Util. Environ. Eff.*, vol. 00, no. 00, pp. 1–19, 2019, doi: 10.1080/15567036.2019.1677818.
- [15] Tekeshwar Prasad Sahu and T. V. Dixit, "Modelling and Analysis of Perturb & Observe and Incremental Conductance MPPT Algorithm for PV Array Using Çuk Converter" *2014 IEEE Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science*, 2014. DOI: 10.1109/SCEECS.2014.6804468.
- [16] Rajiv Roshan; Yatendra Yadav; S Umashankar; D Vijayakumar; D P Kothari, "Modeling and simulation of Incremental conductance MPPT algorithm based solar Photo Voltaic system using CUK converter." *2013 International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability*, DOI: 10.1109/ICEETS.2013.6533450
- [17] S. Riyadi, "Single-phase single-stage PV-grid system using VSI based on simple control circuit," *Int. J. Power Electron. Drive Syst.*, vol. 3, no. 1, pp. 9–16, 2013, doi: 10.11591/ijpeds.v3i1.1860.
- [18] J. Sastry, P. Bakas, H. Kim, L. Wang, and A. Marinopoulos, "Evaluation of cascaded H-bridge inverter for utility-scale photovoltaic systems," *Renew. Energy*, vol. 69, pp. 208–218, 2014, doi: 10.1016/j.renene.2014.03.049.
- [19] M. ŞEKER, "Parameter estimation of positive lightning impulse using curve fitting-based optimization techniques and least squares algorithm," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 205, no. November 2021, 2022, doi: 10.1016/j.epsr.2021.107733.
- [20] F. Heidler, J. M. Cvetić, and B. V. Stanić, "Calculation of lightning current parameters," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 14, no. 2, pp. 399–404, Apr. 1999, doi: 10.1109/61.754080.
- [21] F. Heidler and J. Cvetić, "A class of analytical functions to study the lightning effects associated with the current front," *Eur. Trans. Electr. Power*, vol. 12, no. 2, pp. 141–150, 2002, doi: 10.1002/etep.4450120209.