Fotovoltaik Güç Sistemlerinin Statik ve Dinamik Verimliliğinin R_{opp} Verimlilik Testi Kullanılarak İncelenmesi

Investigation of Photovoltaic Power Systems of Static and Dynamic Efficiency Using R_{opp} Efficiency Test

Ahmet GANİ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
Kayseri Üniversitesi
ahmetgani@kayseri.edu.tr

Özet

Fotovoltaik güç sistemlerinin statik ve dinamik verimliliği için gerçek çalışma koşullarına yakın test koşulları oluşturulmalıdır. Bu amaçla çalışmada fotovoltaik güç sistemlerinin statik ve dinamik verimliliğinin incelenmesinde, artımsal iletkenlik (Aİ) ve değiştir & gözle (DG) maksimum güç noktası (MGN) izleyici kullanılarak gerçek çalışma koşullarına yakın uluslararası standartlarda R_{opp} test profili önerilmiştir. Önerilen test profili için Aİ ve DG MGN izleyicinin başarımı güç izleme doğruluğu bakımından incelenerek fotovoltaik güç sisteminin statik ve dinamik verimliliği nicel olarak Matlab/Simulink benzetim ortamında değerlendirilmiştir. Aİ MGN izleyicinin D&O MGN izleyiciye göre statik ve dinamik verimlilik başarım iyileştirme değerleri sırasıyla 0.16% ve 7.82%'dir.

Abstract

For the static and dynamic efficiency of photovoltaic power systems, test conditions compatible with real operating conditions should be created. For this aim, a Ropp test profile in international standards, compatible with real operating conditions, was proposed by using the incremental conductance (IC) and perturb and observe (P&O) maximum power point (MPP) tracker to examine the static and dynamic efficiency of photovoltaic power systems in study.For the proposed test profile, the performance of the IC and P&O MGN tracker was examined in terms of power tracking accuracy and the static and dynamic efficiency of the photovoltaic power system was quantitatively evaluated in the Matlab/Simulink simulation environment.The IC MGN tracker has static and dynamic efficiency performance improvement values of 0.16% and 7.82%, compared to the D&G MGN tracker, respectively.

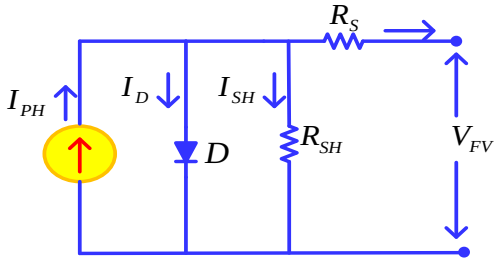
1. Giriş

Maksimum güç noktası izleyicileri, fotovoltaik güç sistemlerini maksimum güç noktasında (MGN) tüm atmosferik (sıcaklık ve ışınım) koşulları altında mümkün olan en yüksek verimlilikte tutmayı amaçlamaktadır [1-2]. Bu amaca ulaşmak için değişken başarım derecelerine sahip MGN izleyiciler geliştirilmiştir [3]. MGN izleyicileri klasik (değiştir & gözle, artımsal iletkenlik ve tepe tırmanma) olarak, akıllı MGN izleyicileri ise bulanık mantık, meta-sezgisel optimizasyon algoritmaları ve yapay sinir ağları olarak sınıflandırmak mümkündür [4]. Doğru akım (DA) çeviriciler fotovoltaik güç sistemlerinde MGN izleyicileri ile birlikte kullanılarak yüke güç aktarımı sağlayan temel güç elektroniği devreleridir. Klasik DA çeviricilerin (azaltan, artıran ve hem azaltan hem artıran) çıkış gerilim kazancı devredeki parazitik elemanların etkisinden belirli bir seviyeye kadar olabilmektedir [5-6]. Parazitik etki Luo DA çeviricilerde kullanılan gerilim yükseltme yöntemleri ile ortadan kaldırılmaktadır. Bu sayede güç çeviricisi yüksek gerilim kazancına, yüksek güç yoğunluğuna, düşük salınımlı akım ve gerilim dalgalanmasına sahip olmaktadır [7].Fotovoltaik güç sistemlerinin statik ve dinamik verimliliğinin etkin bir şekilde incelenmesi için hem statik hem de dinamik koşulları içeren ve uluslararası geçerliliği olan EN50530 ve R_{opp} iki farklı standart verimlilik testi mevcuttur. Araştırma literatüründe fotovoltaik güç sistemleri için EN50530 ve R_{opp} verimlilik testlerinin birlikte [8-9] ve R_{opp} [10-12] verimlilik testinin tek başına kullanıldığı çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmada ise yukarıda bahsedilen önceki çalışmalardan farklı olarak fotovoltaik güç sistemi modeli seri olarak bağlanmış iki panel ile oluşturulmuş ve güç aktarımı için ise temel seri süper gerilim yükseltmeli Luo DA çevirici önerilmiştir. MGN izleyici olarak da artımsal iletkenlik (Aİ) ve değiştir&gözle (DG) önerilmiştir. Bu çalışmanın geri kalan kısmı şu şekilde düzenlenmiştir: önerilen fotovoltaik güç sistemi temel unsurları ile bölüm 2'de, önerilen R_{opp} verimlilik testi bölüm 3'te, detaylı benzetim çalışmaları bölüm 4'te ve bölüm 5'te ise yapılan benzetim çalışmalarına dair sonuçlar verilmiştir.

2. Fotovoltaik Güç Sistemi

2.1. Fotovoltaik Hücre Modeli

Fotovoltaik hücreler üzerlerine düşen güneş ışığını elektrik enerjisine çevirirler. Fotovoltaik hücre bir diyot ve diyota paralel bağlı bir akım kaynağı ile modellenebilmektedir. Akım kaynağında üretilen akım fotovoltaik hücre üzerine düşen güneş ışığının yoğunluğuyla doğru orantılı olmaktadır .Şekil 1'de fotovoltaik hücrenin tek diyot devre modeli verilmiştir.



Şekil 1: Fotovoltaik hücrenin tek diyot devre modeli

Hücre üzerinde meydana gelen gerilim düşümlerini temsil etmek amacıyla R_S seri direnci ve kaçak akımları temsilen R_{SH} paralel direnci devre modeline dahil edilerek gerçek model oluşturulmaktadır. Hücre modeline Kirchhoff'un akım yasası uygulandığında tek bir üstel modele dayanan devre modelinin genel akım-gerilim karakteristiği denklem (1)'de verilmektedir [13].

$$I_{FV} = I_{PH} - I_0\left[\exp\left(\frac{V_{FV}+I_{FV}R_S}{n_s V_t}\right)-1\right]-\frac{V_{FV}+I_{FV}R_S}{R_{SH}} \quad (1)$$

2.2. Artımsal İletkenlik MGN İzleyici

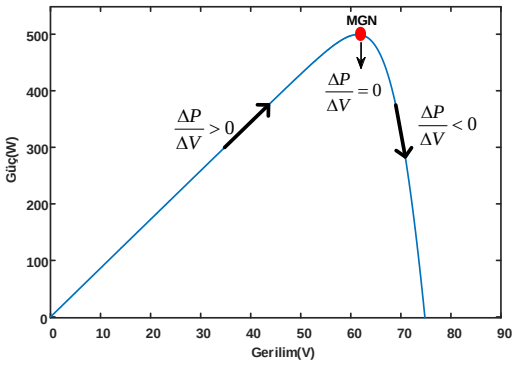
Aİ MGN izleyici, güç izleme hızı ve doğruluğu bakımından kabul edilebilir bir performansa sahiptir. Güç izleyicide fotovoltaik panel gücünün, panel gerilimine göre kısmi türevi alınarak güç çeviricisinin görev oranı (d) ayarlanmaktadır. Bu durum denklem (2) ile ifade edilmektedir [14].

$$\frac{\Delta P_{FV}}{\Delta V} = \frac{\Delta(VI)}{\Delta V} = I + V\frac{\Delta I}{\Delta V} = 0 \quad (2)$$

Denklem (2) panel akımı ve gerilimine göre yeniden düzenlenirse denklem (3) elde edilmektedir.

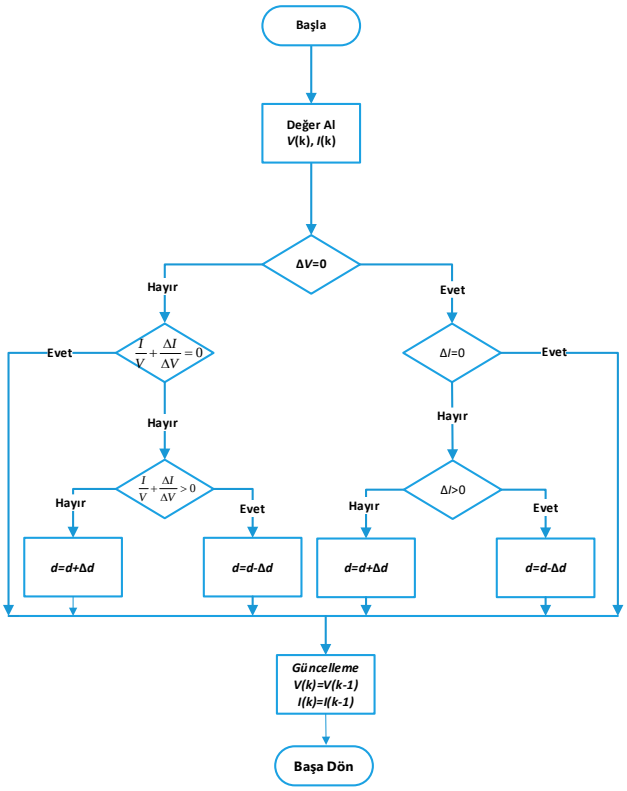
$$-\frac{I}{V} = \frac{\Delta I}{\Delta V} \quad (3)$$

Denklem (3)'ün sol tarafı fotovoltaik panelin ani iletkenlik değerinin negatifini, aynı denklemin sağ tarafı ise artımsal iletkenlik değerini ifade etmektedir. MGN'de ise bu iki değer birbirine eşit fakat zıt işaretlidir. Şekil 2'de Aİ MGN izleyicinin yukarıdaki koşulları içeren güç-gerilim eğrisi görülmektedir.



Şekil 2: Aİ MGN izleyicinin güç-gerilim eğrisi

Aİ MGN izleyicinin temeli, fotovoltaik panel çıkış gücü eğiminin 0 (sıfır) olduğu noktanın MGN, pozitif olduğu yerin MGN'nin solu, negatif olduğu yerin ise MGN'nin sağı olması ilkesine dayanmaktadır[15]. Aİ MGN izleyicinin yukarıda bahsi geçen güç-gerilim eğrisine ait akış şeması ise şekil 3'te verilmiştir.

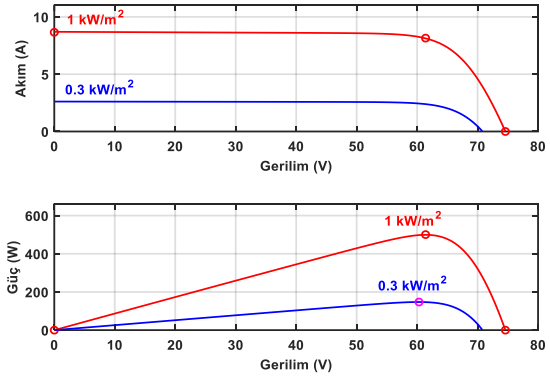


Şekil 3: Aİ MGN izleyicinin akış şeması

Aİ MGN izleyicinin en önemli avantajı, sürekli değişen atmosferik şartlar (ışınım ve sıcaklık) altında tatmin edici sonuçlar veren bir klasik MGN izleyici olmasıdır.

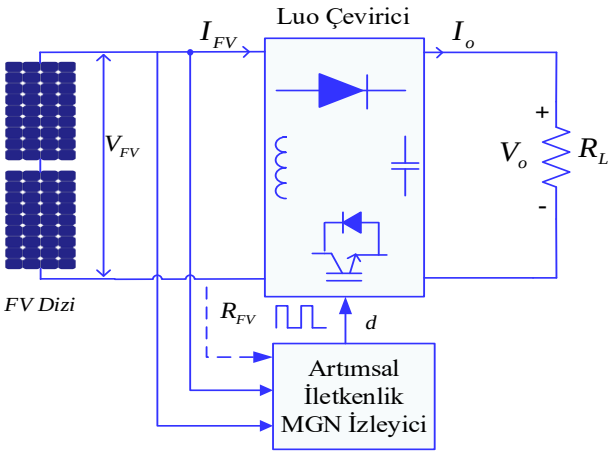
2.3. MGN İzleyicili Temel Seri Süper Gerilim Yükseltmeli Luo Çevirici

Bir fotovoltaik güç sistemi, seri ve paralel olarak bağlanmış bir dizi fotovoltaik panelden oluşur. Bu çalışmada kullanılan fotovoltaik güç sistemi, iki seri fotovoltaik panelden oluşmaktadır. 25°C sıcaklıkta farklı ışınım profillerine sahip fotovoltaik güç sisteminin akım-gerilim ve güç-gerilim karakteristikleri şekil 4'te gösterilmektedir.



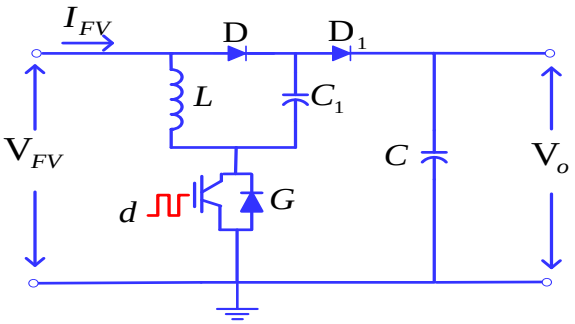
Şekil 4: 25°C sıcaklıkta farklı ışınım profillerine sahip fotovoltaik güç sisteminin akım-gerilim ve güç-gerilim karakteristikleri

Şekil 4'te verilen farklı ışınım profillerindeki fotovoltaik dizinin akım-gerilim (I-V) ve güç-gerilim (P-V) karakteristikleri, ışınımın akım ve güç üzerinde etkin olduğunu göstermektedir. Fotovoltaik dizi ile yük arasındaki güç akışının sağlanması ve diziden belirli atmosferik şartlarda maksimum güç elde edebilmek için fotovoltaik güç sisteminin yapısında denetlenebilen bir DA güç çeviricisi olmalıdır [16]. Şekil 5'te MGN izleyici, temel seri süper gerilim yükseltmeli Luo çevirici ve yükten oluşan fotovoltaik güç sistemi verilmiştir.



Şekil 5: MGN izleyici ve temel seri süper gerilim yükseltmeli Luo çeviriciden oluşan fotovoltaik güç sistemi

Şekil 5'te görüldüğü gibi blok şema, bir fotovoltaik dizinin artımsal iletkenlik MGN izleyici ve süper gerilim yükseltmeli Luo çevirici aracılığıyla bir yüke (R_L) dolaylı olarak bağlanmasından oluşmaktadır. Bu amaçla, temel seri süper gerilim yükseltmeli Luo çevirici, fotovoltaik diziden yüke maksimum güç aktarımını gerçekleştirmek için uygun bir MGN izleyici görev oranı (d) aracılığıyla yük direncini (R_L) optimum fotovoltaik dizi direncine (R_{FV}) eşleştirmek için kullanılır. Şekil 6'da temel seri süper gerilim yükseltmeli Luo çevirici verilmiştir.



Şekil 6: Temel seri süper gerilim yükseltmeli Luo çevirici

Luo çeviricinin çıkışı, darbe genişlik modülasyonu (DGM) aracılığıyla ayarlanan güç yarı iletken elemanının görev oranı (d) ile denetlenmektedir. Çeviricinin çıkış ve giriş gerilimleri arasındaki ilişki aşağıdaki gibidir:

$$V_o = \left(\frac{2-d}{1-d}\right) V_{FV} \tag{4}$$

Burada; V_{FV} fotovoltaik güç sisteminin çıkış, çeviricinin ise giriş gerilimini ifade etmektedir. V_o ise temel seri süper gerilim yükseltmeli Luo çeviricinin çıkış gerilimidir [17]. Çeviricinin bir R_L yükü ile %100 verimlilik oranında ideal olarak çalıştığını varsayılırsa, fotovoltaik güç sistemi tarafından üretilen güç aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$P_{FV} = \left[\left(\frac{2-d}{1-d}\right) V_{FV}\right]^2 \frac{1}{R_L} \tag{5}$$

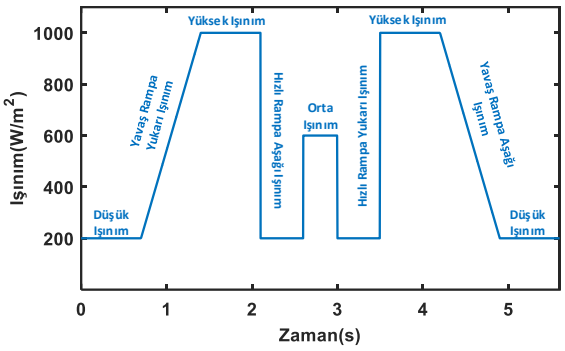
Bu durumda fotovoltaik güç sisteminin MGN'sine karşılık gelen çevirici görev oranı (d) aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$d_{MGN} = \frac{\sqrt{P_{MGN} R_L} - 2V_{MGN}}{\sqrt{P_{MGN} R_L} - V_{MGN}} \tag{6}$$

Burada, V_{MGN}, fotovoltaik güç sisteminin maksimum güç çalışma noktasına karşılık gelen gerilimi belirtmektedir. Maksimum güç çalışma noktasına göre, P_{MGN}, maksimum güç çalışma noktasındaki fotovoltaik sistemin gücüdür. R_L yükü çeviricinin çıkış yükü için eşdeğer dirençtir ve d_{MGN}, maksimum güç çalışma noktasında çevirici için çalışma görev oranını (d) temsil etmektedir.

3. Önerilen R_{opp} Verimlilik Testi

Önerilen verimlilik testi şekil 7'de verilen ışınım-zaman profilini kullanmaktadır.



Şekil 7: R_{opp} verimlilik testi ışınım-zaman profili

Şekil 7'de açıkça görüldüğü gibi R_{opp} verimlilik testi düşük, yavaş/hızlı rampa yukarı/aşağı, orta ve yüksek ışınım profillerinden oluşmaktadır..Fotovoltaik güç sistemlerinin performansını değerlendirmek için en önemli ölçüt MGN verimliliğidir. MGN verimliliği karakteristik olarak statik ve dinamik olarak iki şekilde incelenmektedir. Belirli atmosferik çalışma koşulları (sabit ışınım/sıcaklık) için MGN izleyicinin verimliliği statik verimlilik ile hesaplanmaktadır. Bu durum aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$\eta_s = \frac{P_{FV}(t)}{P_{MGN}(t)} \tag{7}$$

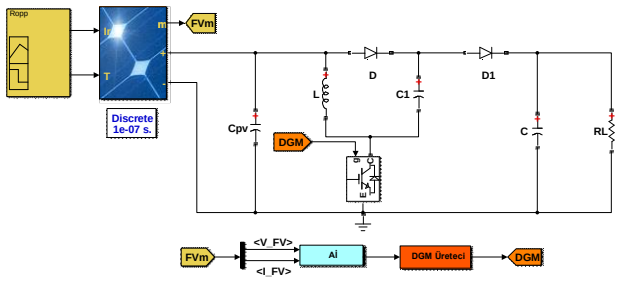
Burada, P_{FV}, t zamanındaki MGN izleyicinin fotovoltaik panelden çekeceği anlık gücü, P_{MGN} ise fotovoltaik panelin t zamanında üretebileceği teorik anlık maksimum güç değerini belirtmektedir. Değişken atmosferik koşullar için ise MGN izleyicinin verimliliği dinamik verimlilik ile hesaplanmaktadır. Bu durum aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$\eta_d = \frac{\int_0^T P_{FV}(t)\,\mathrm{dt}}{\int_0^T P_{MGN}(t)\,\mathrm{dt}} \tag{8}$$

Burada, P_{FV} tüm T test periyodundaki MGN izleyicinin fotovoltaik panelden çekeceği ortalama gücü, P_{MGN} ise fotovoltaik panelin üretebileceği teorik ortalama maksimum gücü temsil etmektedir [18].

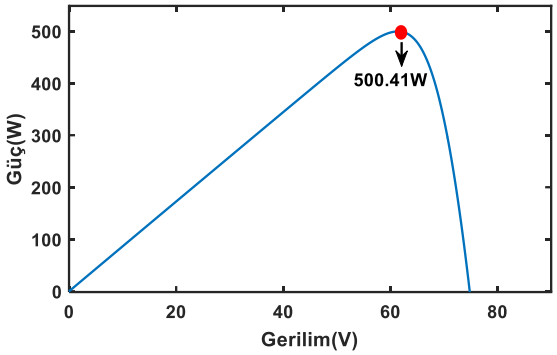
4. Benzetim Çalışmaları

Fotovoltaik güç sistemlerinin verimlilik test süreleri zaman alıcıdır. Bu durum fotovoltaik güç sistemlerinin hesaplama yükünü ciddi oranda arttırmaktadır. Bu durumun üstesinden gelmek için Matlab/Simulink benzetim ortamında bir fotovoltaik güç sistemi modeli önerilmiştir. Önerilen benzetim modeli şekil 8'de verilmiştir.



Şekil 8: Fotovoltaik güç sistemi Matlab/Simulink benzetim modeli

Fotovoltaik güç sisteminin Matlab/Simulink modeli şekil 8'de görüldüğü bir FV dizi, temel seri süper gerilim yükseltmeli güç çevirici, yük direnci, artımsal iletkenlik MGN izleyici ve darbe genişlik modülasyonu (DGM) üretecinden oluşmaktadır. Fotovoltaik paneller daha yüksek güç üretmek için seri olarak bağlanmaktadır. Önerilen benzetim modelinde seri olarak bağlanmış iki adet Soltech STH-250-WH panel ile fotovoltaik dizi oluşturulmuştur. Tek bir MGN'ye sahip fotovoltaik dizinin çıkış gücü şekil 9'da verilmiştir.



Şekil 9: Tek bir MGN'ye sahip fotovoltaik dizinin çıkış gücü

Fotovoltaik diziye ait parametreler ise çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1: Fotovoltaik diziye ait parametreler

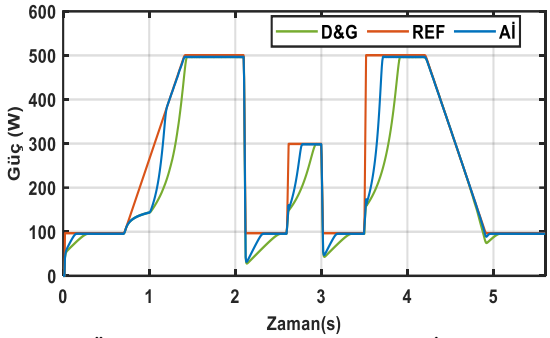
MGN Çalışma Gerilimi	61.4 V
MGN Çalışma Akımı	8.15 A
Açık Devre Gerilimi	37.3 V
Kısa Devre Akımı	8.66 A
Standart Test Koşulları için Maksimum Güç	500.41 W

Fotovoltaik güç sisteminin güç aktarım elemanı temel seri süper gerilim yükseltmeli Luo çevirici için seçilen eleman değerleri çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2: Temel seri süper gerilim yükseltmeli Luo çevirici için seçilen eleman değerleri

İndüktör	L	10mH
Giriş Kapasitörü	C_{FV}	150µF
Kapasitör	C_1	22µF
Çıkış Kapasitörü	C	22µF
Anahtarlama Frekansı	f	50Khz
Yük Direnci	R_L	150 Ω

Önerilen R_{opp} verimlilik testi ışınım-zaman profili 200 W/m^2'lik düşük ışımadan başlayarak 600 W/m^2 orta ışınımla ve 1000 W/m^2'lik yüksek ışınımla devam etmektedir. Düşük ışınım temel olarak bulutlu ışımayı, orta ışınım bulutlu-güneşli ışımayı, yüksek ışınım ise güneşli ışımayı temsil etmektedir. Işınım test profilinde düşük, orta ve yüksek ışınım profilleri statik verimlilik hesabında etkili iken dinamik verimlilikte ise bütün ışınım profilleri etkilidir. Önerilen R_{opp} verimlilik testi kullanılarak Aİ ve D&G MGN izleyicinin güç izleme doğruluğu şekil 10'da verilmiştir.



Şekil 10: Önerilen R_{opp} verimlilik testi için Aİ ve D&G MGN izleyicinin güç izleme doğruluğu

Bu çalışmada önerilen R_{opp} verimlilik testi için toplam benzetim süresi 5.6s. alınmıştır. Ortam sıcaklığı ise benzetim süresi boyunca 25^0C'de sabit tutulmuştur. Benzetim modelinin örnekleme zamanı ise 0.1 µs alınmıştır. Şekil 10'da görüldüğü gibi Aİ ve D&G MGN izleyiciler yavaş yukarı rampa durumunda ve hızlı yukarı rampa durumlarında izleme yönünde sapma yaparken, aşağı hızlı rampa durumlarında ise aşım yapmışlardır. Önerilen ışınım test profili için Aİ MGN izleyicinin statik ve dinamik verimliliğine ait hesaplanan sayısal değerler sırasıyla 99.255% ve 91.515% iken D&G MGN izleyicinin statik ve dinamik verimliliğine ait hesaplanan sayısal değerler sırasıyla 99.420% ve 84.359%'dur. Dinamik verimlilik değerleri her iki MGN izleyicide güç izleme yönündeki sapmalardan dolayı statik verimlilik değerlerinden daha düşüktür.

5. Sonuçlar

Bu çalışmada, fotovoltaik güç sistemlerinin statik ve dinamik verimliliği uluslararası geçerliliği olan standartlaştırılmış R_{opp} ışınım testi ile Aİ ve D&G MGN izleyiciler kullanılarak incelenmiştir. Önerilen test profili, tekrarlanabilirlik, gerçek koşullara uygunluk ve dinamik ışınım koşullarına sahip olmasından dolayı Aİ ve D&G MGN izleyicilerin performansının nicelleştirilmesi bakımından tercih edilmiştir. Benzetim çalışmasından elde edilen sonuçlar incelendiğinde önerilen test profili için Aİ MGN izleyicinin daha az güç salınımına sahip olması statik verimlilik bakımından ve güç izleme yönü doğruluğu da dinamik verimlilik bakımından D&G MGN izleyiciye göre daha iyi başarım değerlerine sahip olmasını sağlamıştır.

6. Kaynaklar

Hohm, D.P., & R_{opp}, M.E., "Comparative Study of Maximum Power Point Tracking Algorithms", Progress in photovoltaics: Research and Applications,11(1), 47-62, 2003.

Valentini, M., Raducu, A., Sera, D., & Teodorescu, R.," PV Inverter Test Setup for European Efficiency, Static and Dynamic MPPT Efficiency Evaluation", IEEE 11th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, 2008, pp. 433-438.

Esram, T., & Chapman, P. L., "Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques", IEEE Transactions on energy conversion, 22(2), 439-449.2007.

Gani, A., Açıkgöz, H., & Şekkeli, M., "Fotovoltaik Sistemlerde Değişken Yük ve Güneş Işınımı Altında Sinirsel-Bulanık Denetleyici ile Maksimum Güç Noktası Takibi", Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, (19), 734-745, 2020.

Kececioglu, O.F., Acikgoz, H., & Gani, A., "Fuzzy-PI based MPPT Control for Photovoltaic Systems", Innovations in Intelligent Systems and Applications Conference, pp. 1-4, 2018.

Kececioglu, O. F., Gani, A., & Sekkeli, M., "Design and Hardware Implementation Based on Hybrid Structure for MPPT of PV System Using an Interval Type-2 TSK Fuzzy Logic Controller", Energies, 13(7), 1842, 2020.

Kececioglu, O.F., Gani, A., & Sekkeli, M.,"Improved Hybrid Intelligent Controller Design for MPPT of Stand-alone PV System", Turkish Journal of Engineering, 5(1), 20-28, 2021.

Abdel-Salam, M., El-Mohandes, M. T., & El-Ghazaly, M., "An Efficient Tracking of MPP in PV systems Using a newly-formulated P&O MPPT Method under Varying Irradiation Levels", Journal of Electrical Engineering & Technology, 15(1), 501-513,2020.

Ahmed, J., & Salam, Z., "An Improved Perturb and Observe (P&O) Maximum Power Point Tracking (MPPT) Algorithm for Higher Efficiency", Applied Energy, 150, 97-108, 2015.

R_{opp}, M., Cale, J., Mills-Price, M., Scharf, M., & Hummel, S. G., "A Test Protocol to Enable Comparative Evaluation of Maximum Power Point Trackers under both Static and Dynamic irradiance", 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (pp. 003734-003737), 2011.

Li, Q., Zhao, S., Wang, M., Zou, Z., Wang, B., & Chen, Q., "An Improved Perturbation and Observation Maximum Power Point Tracking Algorithm Based on a PV Module Four-Parameter Model for Higher Efficiency", Applied Energy, 195, 523-537, 2017.

Devi, V. K., Premkumar, K., Beevi, A. B., & Ramaiyer, S., "A modified Perturb & Observe MPPT Technique to Tackle Steady State and Rapidly Varying Atmospheric Conditions", Solar Energy, 157, 419-426, 2017.

Gani, A., "Fotovoltaik Sistemlerde Maksimum Güç Noktasının Optimal Denetimi ve Uygulaması", Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 106s, Kahramanmaraş, 2020.

Tüysüz, M., "Hibrit Güç Sistemlerinde Maksimum Güç Noktası Takibi için Bulanık Denetleyicinin Optimizasyonu", Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 122s, Trabzon, 2018.

Özçelik, M.A., "Fotovoltaik Sistemlerde Verim ve Performansın Artırılmasına Yönelik Maksimum Güç Noktası İzleyicisi Tasarımı", Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 116s, Kahramanmaraş, 2015.

Gani, A., & Sekkeli, M., "Experimental Evaluation of Type-2 Fuzzy Logic Controller Adapted to Real Environmental Conditions for Maximum Power Point Tracking of Solar Energy Systems", International Journal of Circuit Theory and Applications, 50(11), 4131-4145, 2022.

Gani, A., "Improving Dynamic Efficiency of Photovoltaic Generation Systems Using Adaptive Type-2 Fuzzy-Neural Network via EN 50530 test procedure", International Journal of Circuit Theory and Applications, 49(11), 3922-3940, 2021.

Andrejašič, T., Jankovec, M., & Topič, M., "Comparison of direct maximum power point tracking algorithms using EN 50530 dynamic test procedure", IET renewable power generation, 5(4), 281-286, 2011.