



Fotovoltaik Sistemlerde Değişken Yük ve Güneş Işınımı Altında Sinirsel-Bulanık Denetleyici ile Maksimum Güç Noktası Takibi

Ahmet Gani^{1*}, Hakan Açıkgoz², Mustafa Şekkeli³

¹ Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş, Türkiye (ORCID: 0000-0002-6487-6066)

² Gaziantep İslam Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Gaziantep, Türkiye (ORCID: 0000-0002-6432-7243)

³ Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş, Türkiye (ORCID: 0000-0002-1641-3243)

(İlk Geliş Tarihi 5 Haziran 2020 ve Kabul Tarihi 26 Ağustos 2020)

(DOI: 10.31590/ejosat.748384)

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

Öz

Fotovoltaik paneller, güneş ışınımına ve ortam sıcaklığına bağlı olarak güneş enerjisini doğrudan doğru akım (DA) elektrik enerjisine dönüştürülebilir yarı iletken yapılardır. Fotovoltaik paneller yapıları gereği doğrusal olmayan akım-gerilim (I-V) karakteristiğine sahiptirler. Fotovoltaik panellerden alınabilecek maksimum güç panel üzerine düşen güneş ışınımı ve panelin sıcaklık değerlerine bağlıdır. Fotovoltaik panellerin belirli atmosferik koşullarda (güneş ışınımı ve ortam sıcaklığı) ürettikleri tek bir maksimum güç değeri vardır. Bu nedenle fotovoltaik panellerin maksimum güç noktası takip sistemleri ile birlikte kullanılması verimlilik açısından oldukça önemlidir. Sürekli değişen atmosferik koşullar (güneş ışınımı, sıcaklık) ve değişken yük maksimum güç noktasının yerini değiştirdiğinden fotovoltaik panelden alınabilecek maksimum gücün sürekli olarak izlenmesi gerekmektedir. Maksimum güç noktası takibi için klasik ve modern yöntemler gibi çeşitli takip yöntemleri bulunmaktadır. Değiştir-gözle (D&G), tepe tırmanma (TT), artımsal iletkenlik (Aİ) klasik yöntemler olup modern yöntemler ise yapay sinir ağları, bulanık mantık ve en iyileme algoritmalarıdır. Bulanık mantık ve yapay sinir ağları gibi modern denetim yapıları birçok uygulamayı gerçekleştirmek için yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bulanık mantık ve yapay sinir ağlarının birlikte kullanılması uyarlamalı bir denetim yapısı oluşturmaktadır. Bu uyarlamalı denetim yapısı, denetim sisteminin çalışma noktasındaki değişimleri daha iyi ayarlamaktadır. Bu çalışmada; fotovoltaik sistemin değişken yük ve güneş ışınımı altında maksimum güç noktası takibi için artımsal iletkenlik ve sinirsel-bulanık denetim yönteminden oluşan iki döngülü takip sistemi önerilmiştir. Önerilen iki döngülü takip sisteminin dinamik performansı değişken yük ve güneş ışınımı altında tek döngülü artımsal iletkenlik yöntemi ile karşılaştırılmıştır. Önerilen takip yapısı her iki durumda da fotovoltaik sistemin maksimum güç çalışma noktasında oluşan değişimlere karşı artımsal iletkenlik yöntemine göre daha iyi uyum göstermiştir.

Anahtar Kelimeler Maksimum Güç, Sinirsel-Bulanık Denetim, Artımsal İletkenlik, Fotovoltaik

Maximum Power Point Tracking with Neuro-Fuzzy Controller Under Variable Load and Solar Irradiance in Photovoltaic Systems

Abstract

Photovoltaic panels are semi-conductor structures that can convert solar energy directly to direct current (DC) electricity power depending on the solar irradiance and ambient temperature. They have a non-linear current-voltage (I-V) characteristic due to their

* Sorumlu Yazar: Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş, Türkiye, ORCID: 0000-0002-6487-6066, agani@ksu.edu.tr

structure. The maximum power obtained from a photovoltaic panel is directly related to solar irradiance and panel temperature. Photovoltaic panels offers a single maximum power point under certain atmospheric conditions (solar irradiance and ambient temperature). Therefore, it is of vital importance to use photovoltaic panels along with maximum power point tracking systems for a more efficient solar power system. Since constantly changing atmospheric conditions (solar irradiance and temperature) and variable load cause changes in maximum power point, the maximum amount of power generated by a photovoltaic panel needs to be tracked continuously. There are various tracking methods such as classical and modern methods for maximum power point tracking. Perturb and observe (P&O), hill climbing (HC), incremental conductance (INC) are among conventional methods, while modern methods include artificial neural networks, fuzzy logic and optimization algorithms. Modern control structures such as fuzzy logic and artificial neural networks are widely used to perform many applications. Using fuzzy logic and artificial neural networks together creates an adaptive control structure, which adjusts changes in the operating point of the control system in a better way. In the present study, a two-loop tracking system consisting of incremental conductance and neuro-fuzzy control is proposed for maximum power point tracking of a photovoltaic system under variable load and solar irradiance. The dynamic performance of the proposed two-loop tracking system was compared with the single-loop incremental conductance method under variable load and solar irradiance. It was observed that the proposed tracking structure better adapted to the changes in the maximum power operating point of the photovoltaic system compared to the incremental conductance method in both cases.

Keywords: Maximum Power; Neuro-Fuzzy Control, Incremental Conductance, Photovoltaic

1. Giriş

Günümüzde artan enerji talebi nedeniyle yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ihtiyaç önemli ölçüde artmıştır. Yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde güneş enerjisi daha yüksek güvenilirliğe sahip temiz bir enerjidir. Fotovoltaik sistemler, fotovoltaik hücrelerin bir araya getirilmesiyle oluşturulmuş, bağlandığı sistemin elektrik enerji ihtiyacını karşılayan yapılardır. Fotovoltaik sistemlerin maksimum güç noktasının etkin bir şekilde takip edilmesi enerji dönüşümünün sürekliliği ve verimlilik açısından önemlidir. Klasik maksimum güç noktası takip yöntemlerinin kalıcı durumda maksimum güç noktası etrafında yüksek güç salınımı, düşük yakınsama hızı ve düşük takip doğruluğu gibi eksiklikleri vardır. Buna karşılık yapay sinir ağları ve bulanık mantık esaslı modern maksimum güç noktası takip yöntemleri kalıcı durumda maksimum güç noktası etrafında düşük güç salınımına, yüksek yakınsama hızına ve yüksek takip doğruluğuna sahiptir[1-2].

Fotovoltaik sistemlerde atmosferik değişimlerden (güneş ışınımı ve ortam sıcaklığı) ve yük değişiminden kaynaklı değişken maksimum güç çalışma noktaları oluşmaktadır. Değiştir-gözle (D&G), tepe tırmanma (TT), artımsal iletkenlik (Aİ) gibi klasik takip yöntemleri sabit adım çalışma aralığına sahip oldukları için sadece tek bir maksimum güç çalışma noktasında en uygun cevabı verirler. Yapay sinir ağları ve bulanık mantık esnek çalışma aralığına sahip olduklarından değişken maksimum güç çalışma noktalarını takip etmede daha çok tercih edilmektedirler. Yapay sinir ağları öğrenme, en iyileme ve uyarlama gibi önemli yeteneklere sahiptir. Bulanık mantık ise uzman kişinin sistem öngörülerini esas alan doğrusal olmayan bir denetim yapısıdır[3]. Bulanık mantık ve yapay sinir ağlarının birlikte kullanılması uzman kişinin sistem öngörülerine dayalı uyarlamalı bir denetim yapısı oluşturmaktadır. Sinirsel-bulanık denetim esaslı maksimum güç noktası takipçisi değişken çalışma koşullarına klasik takip yöntemlerine göre daha iyi uyum sağlamaktadır[4].

DA-DA güç çeviricileri fotovoltaik panel ile yük arasındaki güç aktarımını sağlayan güç elektroniğinin en temel elemanlarıdır[5]. Düşüren, yükselten ve düşüren-yükselten güç çeviricileri gibi tüm birinci nesil DA-DA güç çeviricilerin çıkış gerilimi ve güç aktarım verimliliği, devredeki parazitik elemanların etkileri nedeniyle sınırlandırılmıştır. Gerilim kaldırma yöntemi, DA-DA güç çevirici devre tasarımında yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Çünkü bu yöntem parazitik elemanların etkisini etkin bir şekilde yok ederek yüksek gerilim kazancı sağlamaktadır. Aynı zamanda bu yöntem güç çeviricisine yüksek güç yoğunluğu, basit topoloji, sıfıra yakın gerilim ve akım dalgalanmaları gibi önemli katkılar da sunmaktadır[6]. Bu çalışmada daha düşük çıkış gerilim dalgalanması ve yüksek güç yoğunluğu sağlamak için pozitif çıkışlı Luo çevirici (PÇLÇ) tercih edilmiştir.

Literatürde fotovoltaik sistemlerin değişken atmosferik koşullarda (güneş ışınımı ve ortam sıcaklığı) maksimum güç noktasının takibine yönelik klasik ve modern yöntemlerin tek başlarına ve birlikte kullanıldığı çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmaları klasik değiştir & gözle ve artımsal iletkenlik yöntemleri [7-8,11], model öngörülü ve uyarlamalı bulanık mantık esaslı yöntemler [9-10], değişken adım aralıklı klasik yöntemler [12], bulanık mantık [13-14] ve yapay sinir ağları [15] esaslı modern yöntemler olarak sınıflandırmak mümkündür. Bu çalışmada literatürdeki mevcut çalışmalardan farklı olarak değişken yük ve güneş ışınımı altında fotovoltaik panelden maksimum güç elde etmek için iki döngülü takipçi yapısı önerilmiştir. İki döngülü takipçi yapısında birinci maksimum güç noktasını arama döngüsü iken, ikinci maksimum güç noktası takip döngüsüdür. Arama döngüsünde maksimum güç noktasının hesabı için artımsal iletkenlik (Aİ) yöntemi önerilirken takip döngüsü için ise sinirsel-bulanık denetim yöntemi önerilmiştir.

Bu çalışmanın ana katkıları aşağıda verilmiştir:

- Artımsal iletkenlik yöntemi ve sinirsel-bulanık denetim yapısını birleştiren yeni bir iki döngülü maksimum güç noktası takipçisi önerilmiştir.
- Önerilen iki döngülü takipçi değişken yük ve güneş ışınımı altında oluşan yeni maksimum güç noktası için yüksek uyum yeteneğine sahiptir. Aynı zamanda önerilen takipçi fotovoltaik sistemin tepki hızını arttırmış ve kararlı durum güç salınımlarını azaltmıştır.

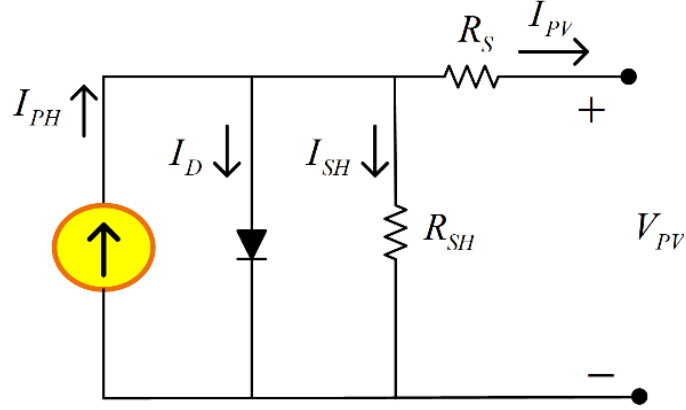
Bu çalışma şu şekilde düzenlenmiştir: ikinci bölümde fotovoltaik hücrenin eşdeğer devre modeli, maksimum güç noktası takip sistemlerinin yapısı ve önerilen fotovoltaik maksimum güç noktası takipçisi materyal ve metod kısmı olarak verilmiştir. Üçüncü bölümde

pozitif çıkışlı Luo çeviricinin analizi ve benzetim çalışmaları araştırma bulguları ve tartışmalar olarak sunulmuştur. Son bölümde ise sonuçlar ve öneriler tartışılmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Fotovoltaik Hücrenin Eşdeğer Devre Modeli

Fotovoltaik hücreler üzerine güneş ışığı düştüğünde fotovoltaik enerjiyi elektrik enerjisine çeviren elemanlardır. Fotovoltaik bir hücre bir diyota paralel bağlı bir akım kaynağı ile modellenmektedir. Akım kaynağı sabit akım üretmekte ve üretilen akım hücre üzerine düşen güneş ışığının yoğunluğuyla doğru orantılı olmaktadır. Fotovoltaik hücrelerin modellenmesinde tek diyot modeli sade olduğu için daha çok tercih edilmektedir. Şekil 1’de fotovoltaik hücrenin tek diyot modeli verilmiştir.



Şekil 1. Fotovoltaik hücrenin tek diyot modeli

Hücre üzerinde meydana gelen gerilim düşümlerini temsil etmek amacıyla R_S seri direnci ve kaçak akımları temsilen R_{SH} paralel direnci modele dahil edilerek gerçek model oluşturulmaktadır. Hücre modeline Kirchoff’un akım yasası uygulandığında tek bir üstel modele dayanan fotovoltaik hücrenin genel akım-gerilim karakteristiği denklem 1’de verilmektedir[16].

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

I_{PH} : Fotovoltaik etki ile üretilen akım

I_0 : Diyot ters doyum akımı

R_S : Panel seri direnci

R_{SH} : Panel paralel direnci

n_s : Paneldeki seri bağlı hücre sayısı

V_t : Fotovoltaik hücrenin termal gerilimi

A : Diyot idealite faktörü

K : Boltzman sabiti ($1,381 \times 10^{-23}$ J/K)

q : Elektron yükü ($1,602 \times 10^{-19}$ C)

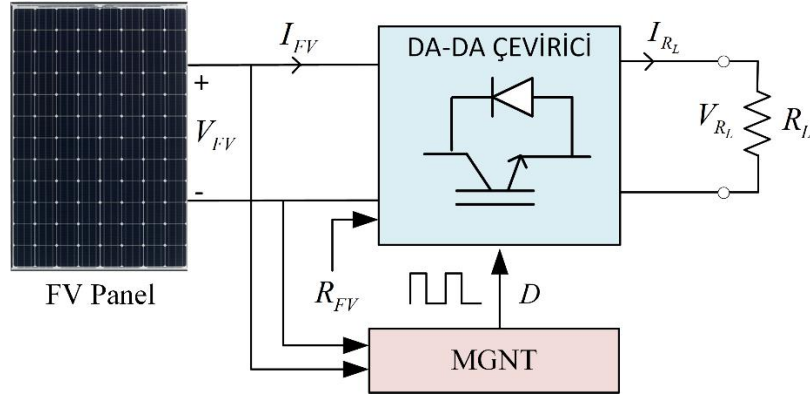
T : Fotovoltaik hücrenin kelvin cinsinden mutlak sıcaklığı

Denklem 1’de geçen V_t birleşim termal gerilimi olup denklem 2 ile bulunmaktadır.

$$V_t = \frac{AkT}{q} \quad (2)$$

2.2. Maksimum Güç Noktası Takip Sistemlerinin Yapısı

Fotovoltaik panel ile yük arasındaki güç aktarımındaki uyumsuzluğu gidermek ve panelden belirli atmosferik şartlarda maksimum güç çekebilmek için maksimum güç noktası takip (MGNT) sisteminin yapısında denetlenebilen bir DA-DA güç çeviricisi olmalıdır. MGNT sisteminde DA-DA güç çevirici fotovoltaik panel ile yük arasında görev yapmaktadır. Şekil 2’de MGNT sistemine ait şematik diyagram verilmiştir.



Şekil 2. MGNT sistemine ait şematik diyagram

Şekil 2’de verilen yük direnci denklem 3’de verilmiştir.

$$R_L = \frac{V_{R_L}}{I_{R_L}} \quad (3)$$

Burada V_{R_L} çıkış yük gerilimi ve I_{R_L} çıkış yük akımıdır. Fotovoltaik panelin standart test koşullarında (STK) panel tarafında görülen optimal yük direnci (R_{opt}) denklem 4’deki gibi tanımlanmaktadır.

$$R_{opt} = V_{MGN} / I_{MGN} \quad (4)$$

V_{MGN} ve I_{MGN} sırasıyla maksimum güç noktasındaki gerilim ve akımdır. Fotovoltaik panelin optimal yük direnci güneş ışınımı ve sıcaklığa bağlı olarak anlık değişmektedir. R_L değeri R_{opt} ile eşleştiğinde fotovoltaik panelden yüke maksimum güç aktarımı gerçekleşmektedir. MGNT'nin amacı, yük direncini fotovoltaik panelin optimal yük direncine eşitlemektir. İdeal şartlarda fotovoltaik sistem için giriş gücü ve çıkış gücü eşitliği denklem 5’deki gibi yazılabilmektedir.

$$\frac{I_{FV}}{I_{R_L}} = \frac{V_{R_L}}{V_{FV}} \quad (5)$$

Denklem 5 düzenlenirse;

$$R_{FV} = \left(\frac{V_{FV}}{V_{R_L}} \right)^2 R_L \quad (6)$$

elde edilir. DA-DA güç çeviricisinin giriş gerilimi ve çıkış gerilimi arasındaki ilişki denklem 7’de verilmiştir.

$$V_{R_L} = M(D)V_{FV} \quad (7)$$

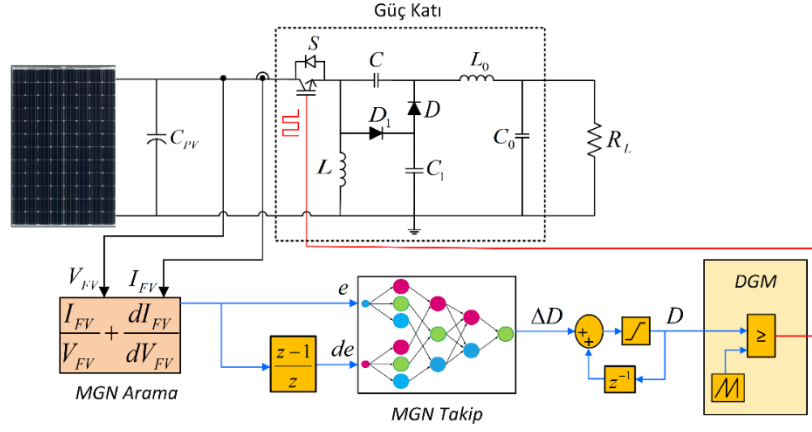
Burada D DA-DA güç çeviricisinin anahtarlama oranını ifade etmektedir. $M(D)$ ise DA-DA güç çeviricisinin anahtarlama oranına bağlı dönüştürme oranıdır. Sürekli iletim modunda çalışan ideal DA-DA güç çeviricileri için dönüştürme oranı (M) anahtarlama oranı (D)’nin bir fonksiyonudur. Denklem 7’de verilen $M(D)$ denklem 6’da yerine yazılırsa denklem 8 elde edilmektedir.

$$R_{FV} = \frac{R_L}{(M(D))^2} \quad (8)$$

Denklem 8’de görüldüğü gibi R_{FV} ve R_L $M(D)$ ’nin fonksiyonudur. Aynı zamanda belirli bir R_L değeri için R_{FV} ’nin $M(D)$ ile ayarlanabileceği görülmektedir. Sonuç olarak, DA-DA güç çeviricisinin anahtarlama oranı (D) değiştirilerek, R_{FV} değerinin R_{opt} ile eşleştirilmesi fotovoltaik panelden maksimum güç elde edilmesini sağlamaktadır[17].

2.3. Önerilen Fotovoltaik Maksimum Güç Noktası Takipçisi

Fotovoltaik sistemlerin güç dönüşüm verimliliklerini artırmak için maksimum güç noktası (MGN) takipçi kullanılmalıdır. Önerilen iki döngülü fotovoltaik maksimum güç noktası takip sistemi Şekil 3’te verilmiştir.



Şekil 3. Önerilen iki döngülü fotovoltaik maksimum güç noktası takip sistemi

Önerilen iki döngülü fotovoltaik maksimum güç noktası takip sisteminde birinci ve ikinci döngüler, sırasıyla MGN arama ve MGN takip için kullanılmaktadır. MGN arama döngüsünde panelden çekilen güçteki değişime (dP_{FV} / dV_{FV}) bakılarak artımsal iletkenlik yöntemi ile maksimum güç noktası hesaplanmaktadır. Panelden çekilen güç değişiminin sıfır ($dP_{FV} / dV_{FV} = 0$) olduğu nokta maksimum güç noktasıdır. Bu durum denklem 9-10 ile ifade edilmiştir.

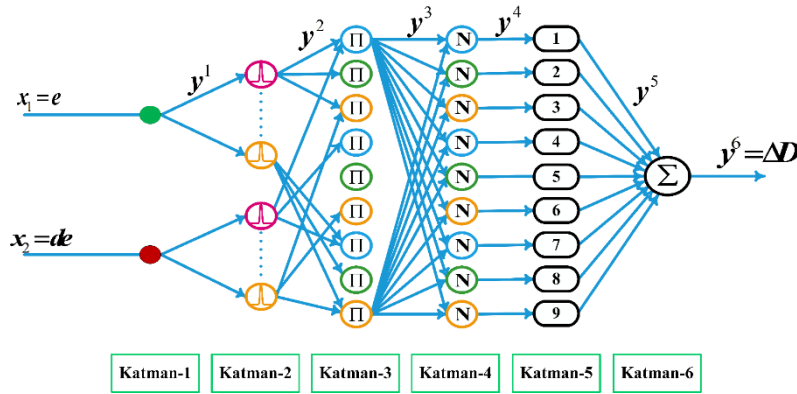
$$\frac{dP_{FV}}{dV_{FV}} = \frac{d(V_{FV} I_{FV})}{dV_{FV}} = 0 \quad (9)$$

$$\frac{I_{FV}}{V_{FV}} + \frac{dI_{FV}}{dV_{FV}} = 0 \quad (10)$$

MGN takip döngüsünün girişleri hata ve hata değişimidir. MGN takip döngüsünün çıkışındaki ΔD anahtarlama oranındaki değişimi ifade etmektedir. Anahtarlama oranı (D), darbe genişlik modülasyonu ile DA-DA çeviricinin güç katındaki anahtarlama elemanına (S) uygulanmaktadır.

2.3.1. Sinirsel-Bulanık Denetim

Sinirsel-bulanık ağ yapısı karmaşık sistemlerin modellenmesi ve denetiminde kullanılan yapay sinir ağı ve bulanık mantığın uygun şekilde birleşiminden oluşan bir ağ yapısıdır. Bu yapı yapay sinir ağlarının öğrenme, uyum gibi özelliklerine sahip olduğu gibi bulanık mantığın karar verme ve çıkarım yapabilme özelliklerini de yapısında bulundurmaktadır[18]. Üç üyelik fonksiyonu ile bulanıklaştırılmış iki giriş ve bir çıkışa sahip altı katmanlı bir yapay sinir ağı mimarisine sahip dokuz kurallı sinirsel-bulanık denetim yapısı Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. Sinirsel-bulanık denetim yapısı

Sinirsel-bulanık denetim yapısında birinci dereceden Sugeno bulanık çıkarım modeli esas alınmıştır. Birinci dereceden bir Sugeno tipi bulanık model kuralları aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$A^j = \text{Eğer}; x_1, B_1^j \text{ ve } x_2, B_2^j \text{ ve } x_n, B_n^j \text{ ise O Halde } y=f_n = b_0^j + b_1^j x_1 + b_2^j x_2 + b_n^j x_n \quad (11)$$

Burada; x ile y sırasıyla giriş ve çıkış değişkenleridir. $B_i^j, \mu_{A_i^j}(x_i)$ üyelik fonksiyonu önkoşullarının dilsel değişkenleridir.

Şekil 4'ten de görüldüğü gibi sinirsel-bulanık denetleyici iç mimarisinde altı katman bulunmaktadır. Bu katmanlara ait özellikler aşağıdaki gibi açıklanabilir.

Katman-1: Bu katman giriş katmanıdır ve herhangi bir hesaplama bu katmanda yapılmaz. Bu katman hata ve hatanın değişimi olarak iki giriş ve tek çıkışa sahiptir. Hata girişi denklem 12’de hatanın değişimi ise denklem 13’de verilmiştir.

$$e(k) = P_{ref} - P_{antık} \quad (12)$$

$$de = e(k) - e(k-1) \quad (13)$$

Katman-2: Her bir giriş değişkeni için belirlenen üyelik fonksiyonu derecelerinin oluşturulduğu katmandır. Katmanın girişinde bulunan hata ve hatanın değişimi için üyelik fonksiyonu tipi belirlenmelidir. Bu çalışmada her bir giriş için üç adet genelleştirilmiş çan üyelik fonksiyonu önerilmiştir. Genelleştirilmiş çan üyelik fonksiyonu denklem 14’de verilmiştir.

$$y_j^2 = \left| \frac{x_i^2 - g_{ij}}{d_{ij}} \right|^{2f_i} \quad (14)$$

Burada, d, f ve g çan üyelik fonksiyonu parametreleridir.

Katman-3: Bu katman aynı zamanda kural çıkarım katmanı olarak bilinmektedir. Katmanda Π sembolü ile gösterilen her düğüm çarpım operatörü ile elde ettiği ateşleme kuvveti çıkışlarını bir sonraki katmana göndermektedir.

$$y_k^3 = \prod_i y_{ij}^2 \quad k=1,2,\dots,9 \quad (15)$$

Katman-4: Normalizasyon katmanı olarak da bilinir ve her düğüm N ile etiketlenmektedir. Bir önceki katmandan elde edilen her bir ateşleme kuvveti çıkışları sabit düğümler içerir. Herhangi bir k. düğüm için normalizasyon işlemi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$y_k^4 = \frac{y_k^3}{\sum_k y_k^3} \quad (16)$$

Katman-5: 4.katmandan elde edilen normalleştirilmiş kuralların ateşleme kuvveti çıkışlarının birinci dereceden bir f fonksiyonu ile çarpılmasıyla kural çıktıları hesaplanmaktadır.

$$y_k^5 = y_k^4 \cdot f_k \quad (17)$$

$$f_k = p_k x_1 + q_k x_2 + r_k \quad (18)$$

Burada (p_k, q_k, r_k) ve f_k sinirsel-bulanık denetleyicinin sonuç parametreleri olarak adlandırılır. Sonuç parametreleri, geri yayılım algoritması kullanılarak uyarlanır.

Katman-6: Bu katman sinirsel-bulanık denetleyicinin çıkış katmanıdır. Katman çıkışında düğümlerden gelen tüm sinyallerin toplamını hesaplayan Σ etiketli sabit bir düğüm bulunmaktadır. Katman çıkışı durulaştırılmış kesin değerdir.

$$y^6 = \Delta I_d = \sum_k y_k^5 \quad (19)$$

Sonuç parametreleri sistem çıkış hatasına bağlı olarak aşağıdaki gibi tanımlanan uygunluk fonksiyonunu geri yayılım algoritması ile sıfıra yaklaştıracak şekilde uyarlanır.

$$E = \frac{1}{2} (P_{ref} - P_{antık})^2 \quad (20)$$

Geriye yayılım algoritmasıyla sonuç parametrelerinin uyarlanması aşağıdaki denklem ile yapılır.

$$D(k) = D(k-1) + \Delta D(k) = D(k-1) + \left(-\alpha \frac{\partial E(k)}{\partial D(k)} \right) \quad (21)$$

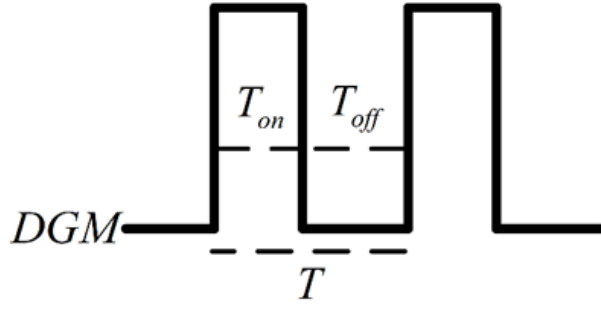
Burada α öğrenme oranıdır. Bu çalışmada öğrenme oranı 0.25 seçilmiştir.

3. Araştırma Sonuçları ve Tartışma

3.1. Pozitif Çıkışlı Luo Çevirici (PCLÇ) Analizi

Anahtarlamalı DA-DA güç çeviricileri, denetimli bir yarı iletken anahtarlama elemanı, diyot, bobin, kapasitör ve yük direncinden oluşur. Devrede bulunan yarı iletken anahtarlama elemanı iletim bölgesinde ya da kesim bölgesinde çalıştırılmaktadır. DA-DA güç çeviricilerin denetimi, yarı iletken anahtarlama elemanının bir periyot içerisindeki anahtarlama oranının (D) ayarlanmasıyla yapılır. Anahtarlama

oranı anahtarlama iletim sürelerinin değiştirilmesiyle ayarlanmaktadır. Buna darbe genişlik modülasyonu (DGM) denir. Şekil 5’de darbe genişlik modülasyonuna ait bir periyodik işaret anahtarlama süreleriyle verilmiştir.

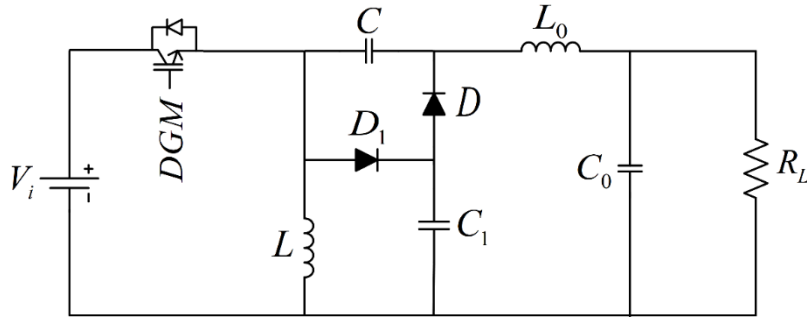


Şekil 5. Darbe genişlik modülasyonu işareti

Anahtarlama oranı (D), anahtarlama elemanının iletimde olduğu sürenin, iletimde (T_{on}) ve kesimde (T_{off}) olduğu süreler toplamı olan DGM işaretinin periyoduna (T) bölümüyle elde edilmektedir. Anahtarlama oranı denklem 22’de verilmiştir.

$$D = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} \quad (22)$$

Anahtarlama elemanı olarak DA-DA güç çevirici devre mimarilerinde JFET, MOSFET ve IGBT gibi yarı iletken güç elemanları kullanılmaktadır. Bu elemanlar yüksek frekansta tetiklenebilmektedir[19]. Bu çalışmada kullanılan PÇLÇ sürekli iletim çalışma modunda analiz edilmiştir. Sürekli iletim çalışma modu çeviriciler için kararlı çalışma modudur. Kararlı durum analizi yapılırken PÇLÇ devre elemanları ideal kabul edilmiştir. PÇLÇ devre modeli Şekil 6’da verilmiştir.



Şekil 6. PÇLÇ devre modeli

PÇLÇ'nin devre eleman sınır değerleri denklem 23-27’de verilen bobin akımlarının değişim oranlarına ve kapasitör gerilimlerinin değişim oranlarına göre hesaplanmaktadır. L bobini üzerinden akan akımın değişim oranı şu şekilde hesaplanabilir:

$$\zeta_1 = \frac{\Delta I_L / 2}{I_L} = \frac{R_L}{2M^2 fL} \quad (23)$$

Benzer şekilde L_0 bobini üzerindeki akımın değişim oranı şu şekilde verilir:

$$\zeta_2 = \frac{\Delta I_{L_0} / 2}{I_{L_0}} = \frac{DR_L}{2MfL_0} \quad (24)$$

C kapasitörü üzerindeki gerilimin değişim oranı şu şekilde hesaplanır:

$$\rho = \frac{\Delta V_C / 2}{V_C} = \frac{D}{2fCR_L} \quad (25)$$

Benzer şekilde, C_1 kapasitörü için gerilim değişim oranı şu şekilde hesaplanır:

$$\sigma_1 = \frac{\Delta V_{C1} / 2}{V_{C1}} = \frac{M}{2fC_1R_L} \quad (26)$$

ve C_0 kapasitörü boyunca gerilim değişim oranı şu şekilde ifade edilebilir:

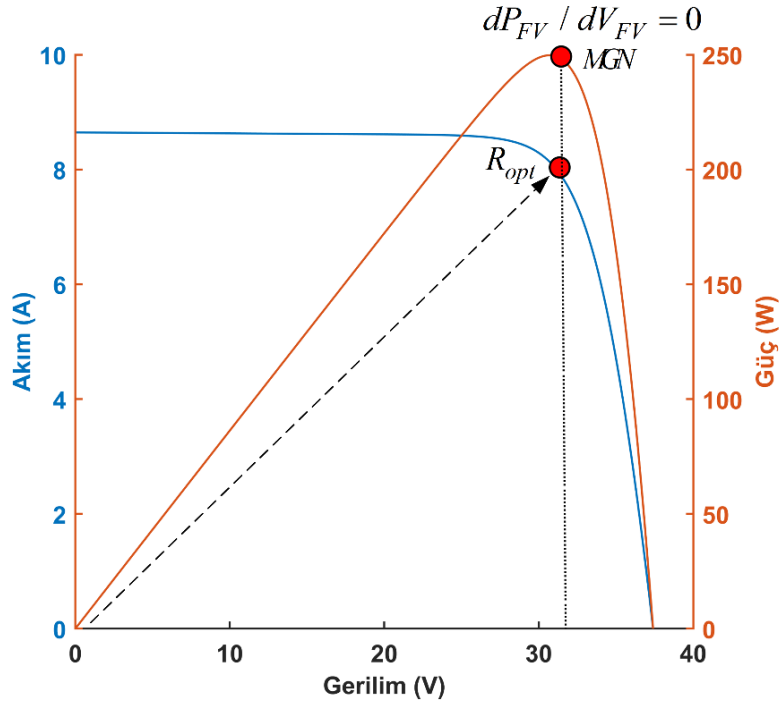
$$\varepsilon = \frac{\Delta V_{C0} / 2}{V_{C0}} = \frac{D}{8Mf^2L_0C_0} \quad (27)$$

Kararlı çalışma modunda PÇLÇ için dönüştürme oranı denklem 28'de verilmiştir [20].

$$M = \frac{V_0}{V_i} = \frac{1}{1-D} \quad (28)$$

3.2. Benzetim Çalışmaları

Bu bölümde fotovoltaik güç dönüşümü için tasarlanan PÇLÇ devre eleman değerleri ve seçilen fotovoltaik panele ait parametreler verilmiştir. İki döngülü fotovoltaik MGN takipçinin başarımını incelemek için STK'da (1000 W/m² güneş ışınımı ve 25 °C sıcaklık) değişken yükte ve değişken güneş ışınımı altında iki farklı çalışma durumu oluşturulmuş ve tek döngülü MGN takipçi ile performans karşılaştırması yapılmıştır. Benzetim çalışmaları MATLAB/Simulink benzetim programı ve "Sim Power System" araç kutusu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Benzetim çalışmaları için düzgün güneş ışınımı dağılımlı tek MGN'li bir FV panel kullanılmıştır. STK'daki FV panelin MGN değeri 250W'dır. STK altında 250W'lık FV panelin akım-gerilim (I-V) karakteristiğindeki optimal yük direnci (R_{opt}) ve güç-gerilim (P-V) karakteristiğindeki maksimum güç noktası ve Şekil 7'de gösterilmiştir.



Şekil 7. FV panel karakteristiklerinde maksimum güç noktası ve R_{opt}

Şekil 7'de FV panelin güç-gerilim (P-V) karakteristiği üzerinde MGN noktası ve güç-gerilim değişimleri (dP_{FV} / dV_{FV}), panelin akım-gerilim (I-V) karakteristiği üzerinde de (R_{opt}) verilmiştir. Önerilen iki döngülü takipçide MGN arama döngüsü MGN'de FV panelin çalışma noktasını düzenlemek ve FV panel ile yük arasında maksimum güç aktarımı sağlamak için bağlı yük direncini panel tarafından görülen optimal yük direncine (R_{opt}) eşleştirme amacıyla kullanılmaktadır. Bu eşleştirme işlemi MGN arama döngüsünde kullanılan artımsal iletkenlik yöntemiyle PÇLÇ'nin anahtarlama oranı (D) ayarlanarak yapılmaktadır. Benzetim çalışmasında kullanılan FV panelin etiket değerleri Tablo 1'de verilmiştir. Denklem 23-27'de verilen tasarım özellikleri kullanılarak hesaplanan PÇLÇ'nin sınır değerleri Tablo 2'de sunulmaktadır. Benzetim çalışmalarındaki güç çeviricisi değerleri PÇLÇ için hesaplanan sınır değerlerinden daha yüksek seçilmiştir. Benzetim çalışmaları için seçilen PÇLÇ değerleri tolerans değerleriyle birlikte Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 1. Benzetim çalışmasında kullanılan fotovoltaik panelin etiket değerleri

Panel Tipi	Polikristal	
Optimal Çalışma Gerilimi	V_{MGN}	30.7 V
Optimal Çalışma Akımı	I_{MGN}	8.15 A
Açık Devre Gerilimi	V_{oc}	37.4 V
Kısa Devre Akımı	I_{sc}	8.63 A
STK için Maksimum Güç	P_{max}	250 W
Panel Verimi	η	15.4 %

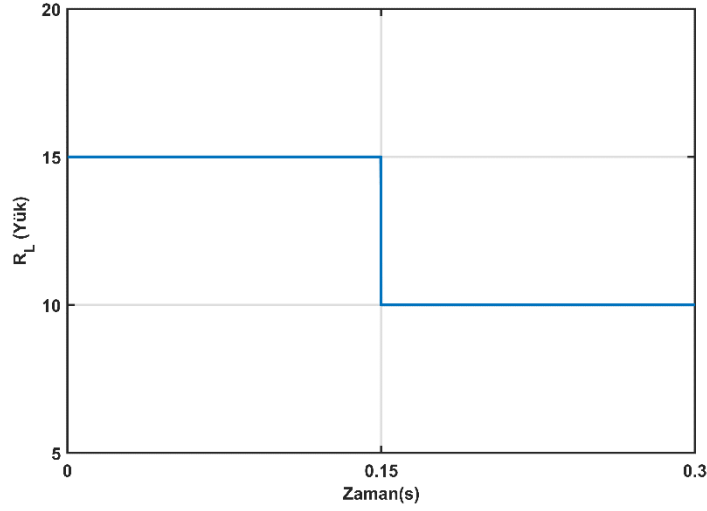
Tablo 2. PÇLÇ'nin hesaplanan sınır değerleri

V_i	30.7 V	L	0.5 mH
V_0	60 V	C_0	70 uF
R_L	15 Ω	C	67 uF
D_{opt}	0.49	C_1	65 uF
L_o	0.5 mH	f	40 kHz
M	1.95	ζ_1	0.1
ε	0.0006	σ_1	0.025
ρ	0.006	ζ_2	0.1

Tablo 3. PÇLÇ'nin seçilen değerleri

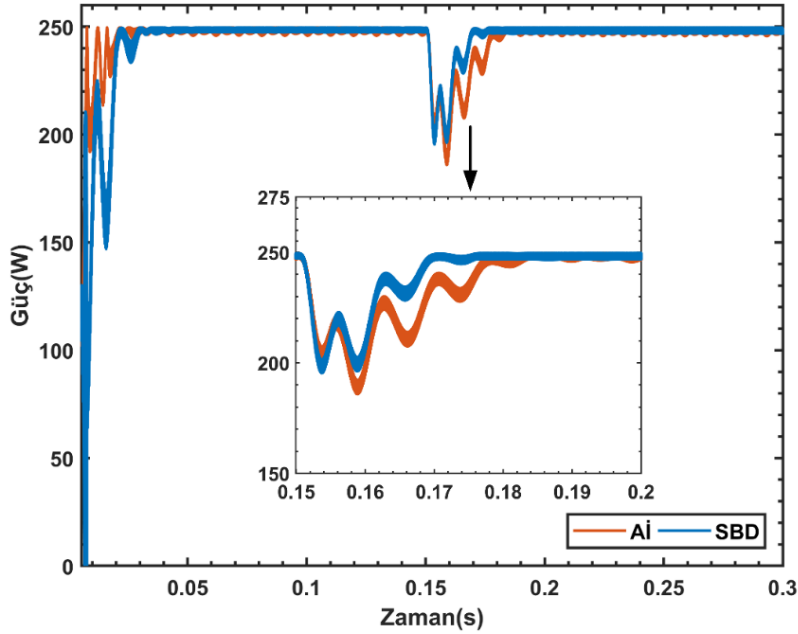
Eleman	Değer	Tolerans
R_L	15 Ω -250 W	%5
L_o	10 mH	-
L	10 mH	-
C_0	220 uF -250 V	%20
C	220 uF -250 V	%20
C_1	220 uF -250 V	%20
C_{PV}	100 uF -100 V	%10

Önerilen iki döngülü takip sisteminin kararlı ve yüksek güç takip doğruluğunda çalışması için takip döngüsünün örnekleme süresi arama döngüsünden daha yüksek seçilmiştir. MGN arama döngüsü için örnekleme süresi 0.1 μ s, MGN takip döngüsü için ise 100 μ s alınmıştır. Birinci çalışma durumu için önerilen MGN takipçinin dinamik performansını incelemek için oluşturulan belirli zaman aralığında değişen sabit yük direnci Şekil 8'de verilmiştir.



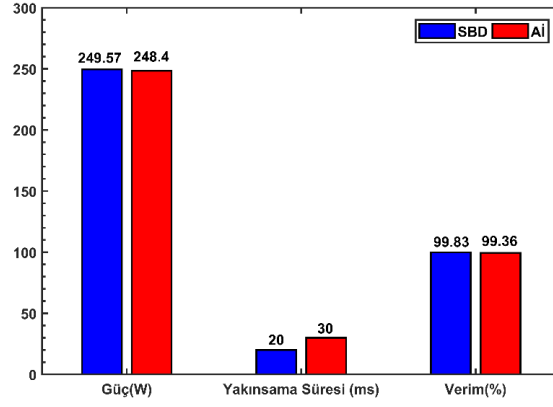
Şekil 8. Belirli zaman aralığında değişen sabit yük direnci

Şekil 8'de görüldüğü gibi sisteme $t=0.15s$ anında 10Ω 'luk değişken yük uygulanmıştır. Birinci çalışma durumunda toplam benzetim süresi $0.3s$ alınmıştır. Önerilen çift döngülü ve tek döngülü MGN takipçinin STK'da belirli zaman aralığında değişen yük altında maksimum güç izleme performansları Şekil 9'da verilmiştir.



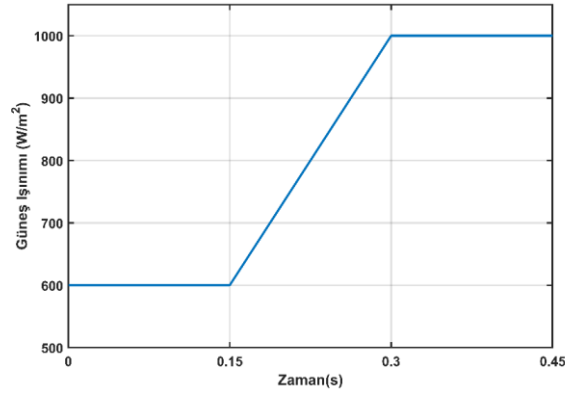
Şekil 9. Önerilen çift döngülü ve tek döngülü MGN takipçinin performansları

Şekil 9'da görüldüğü gibi önerilen çift döngülü ve tek döngülü MGN takipçinin yakınsama süreleri sırasıyla $20 ms$ ve $30 ms$ 'dir. Yakınsama sürelerini takiben önerilen çift döngülü ve tek döngülü MGN takipçinin FV panelden çektikleri maksimum güçler sırasıyla $249.57W$ ve $248.4W$ 'dır. Her iki MGN takipçinin maksimum güç izleme performansları Şekil 10'da performans indeksleri ile incelenmiştir.



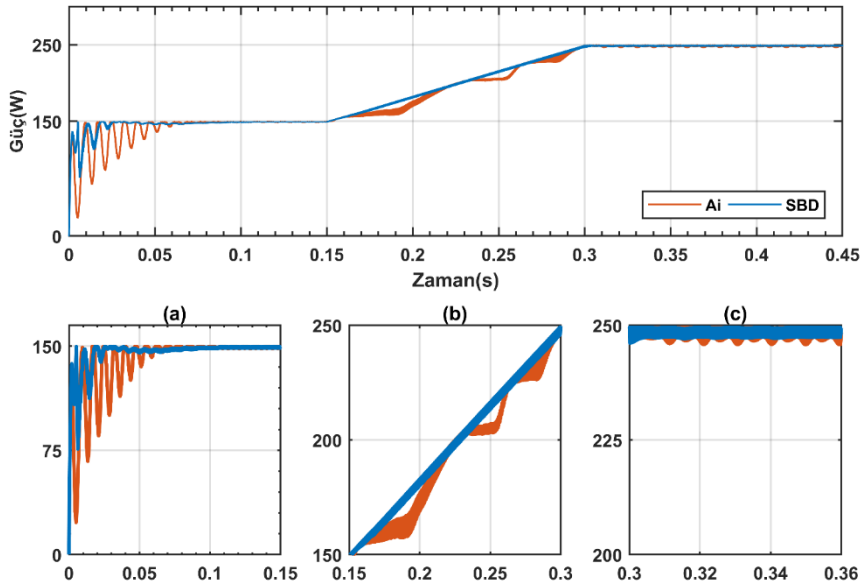
Şekil 10. Her iki MGN takipçinin maksimum güç izleme performansları

Benzetim çalışmasının ikinci çalışma durumunda güneş ışınımı değişken olup panel sıcaklığı 25°C'dir. Toplam benzetim süresi 0.45 s'dir. Güneş ışınımının zamanla değişimi Şekil 11'de verilmiştir.



Şekil 11. Güneş ışınımının zamanla değişimi

Şekil 11'de görüldüğü gibi güneş ışınımı 0-0.15 s arası sabit 600 W/m², 0.15 s-0.3 s arası sabit eğimle doğrusal bir şekilde 600 W/m²'den 1000 W/m²'ye artan rampa biçimli, 0.3 s - 0.45 s arası ise sabit 1000 W/m² olacak şekilde seçilmiştir. Önerilen çift döngülü ve tek döngülü MGN takipçinin değişken güneş ışınımı altında maksimum güç izleme performansları Şekil 12'de verilmiştir.



Şekil 12. Önerilen çift döngülü ve tek döngülü MGN takipçinin değişken güneş ışınımı altında maksimum güç izleme performansları
e-ISSN: 2148-2683

Şekil 12 (a)'da görüldüğü gibi önerilen çift döngülü ve tek döngülü MGN takipçinin yakınsama süreleri sırasıyla 25 ms ve 100 ms'dir. Yakınsama sürelerini takiben önerilen çift döngülü ve tek döngülü MGN takipçinin FV panelden çektikleri maksimum güçler sırasıyla 149.7 W ve 148.3 W'dır. Şekil 12 (b)'de görüldüğü gibi önerilen iki döngülü MGN takipçi sabit eğimle doğrusal bir şekilde artan rampa biçimli güneş ışınımı değişiminde istenen takip yönünü bulmakta hızlı ve doğru olduğu halde tek döngülü MGN takipçi istenen takip yönünü bulmakta başarısızdır. Şekil 12 (c)'de görüldüğü gibi önerilen çift döngülü ve tek döngülü MGN takipçinin maksimum güç salınımları sırasıyla 2.2 W ve 4.12 W'dır.

5. Sonuçlar

Birçok çalışmada tek döngülü MGN takipçi ile güneş ışınımı ve sıcaklık gibi değişen atmosferik koşullar altında maksimum güç noktası takibi yapılmıştır. Bu çalışmada ise sinirsel-bulanık denetim esaslı iki döngülü MGN takipçi ve artımsal iletkenlik yöntemi esaslı tek döngülü MGN takipçinin maksimum güç noktası izleme performansları değişken yük ve güneş ışınımı altında sabit panel sıcaklığında karşılaştırılmıştır. Benzetim çalışması sonuçları değişken yükte ve güneş ışınımında önerilen iki döngülü takip yönteminin MGN'ye tek döngülü takip yöntemine göre daha hızlı bir şekilde ve daha az güç kaybı ile ulaşabileceğini göstermiştir. Aynı zamanda fotovoltaik sistemde değişken yük ve güneş ışınımında önerilen iki döngülü sinirsel-bulanık denetim esaslı MGN takipçi MGN'ye tekrar ulaşmak için çalışma noktasına hızlı bir şekilde uyum göstermiştir. Sonuç olarak önerilen iki döngülü MGN takipçi ile her durumda sürekli ve kalıcı doğrulukla maksimum güç takibi yapılmaktadır. Önerilen iki döngülü MGN takipçi ile yapılan bu iyileştirmeler fotovoltaik sistemin daha verimli çalışmasına katkıda bulunmaktadır.

Kaynakça

- [1] Doğmuş, O., Kılıç, E., Şit, S., & Güneş, M., (2017). PSO Algoritması ile Optimize Edilmiş PID Denetleyicinin Fotovoltaik MPPT Sistemine Uyarlanması, *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20(4), 1-8.
- [2] Kececioglu, O. F., Acikgoz, H., & Gani, A., (2018). Fuzzy-PI Based MPPT Control for Photovoltaic Systems, *In Proceedings of Innovations in Intelligent Systems and Applications*, Adana, 4-6 October, 1-4.
- [3] Dandil, E., & Gürgen, E. (2019). Yapay Sinir Ağları Kullanılarak Fotovoltaik Panel Güç Çıkışlarının Tahmini ve Sezgisel Algoritmalar ile Karşılaştırılması, *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (16), 146-158.
- [4] Acikgoz, H., Kececioglu, O. F., Yıldız, C., Gani, A., & Sekkeli, M. (2016). Performance Analysis of Electronic Power Transformer Based on Neuro Fuzzy Controller. *SpringerPlus*, (5), 1-21.
- [5] Ozdemir, S., Altin, N., & Sefa, I., (2017). Fuzzy Logic Based MPPT Controller for High Conversion Ratio Quadratic Boost Converter, *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(28), 17748-17759.
- [6] Luo, F.L., (1999). Positive Output Luo Converters: Voltage Lift Technique. *IEEE Proceedings., Electric Power Applications*, 146(4), 415-432.
- [7] Soon, T. K., & Mekhilef, S., (2015). A Fast-Converging MPPT Technique for Photovoltaic System under Fast-Varying Solar Irradiation and Load Resistance, *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 11(1), 176-186.
- [8] Yilmaz, U., Turksoy, O., & Teke, A., (2019). Improved MPPT Method to Increase Accuracy and Speed in Photovoltaic Systems under Variable Atmospheric Conditions, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* (113), 634-651.
- [9] Lashab, A., Sera, D., & Guerrero, J.M., (2019). A Dual-Discrete Model Predictive Control-Based MPPT for PV Systems, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 34(10), 9686-9697.
- [10] Rezk, H., Aly, M., Al-Dhaifallah, M., & Shoyama, M., (2019). Design and Hardware Implementation of New Adaptive Fuzzy Logic-Based MPPT Control Method for Photovoltaic Applications, *IEEE Access*, (7) 106427-106438.
- [11] Kirciođlu, O., Ünlü, M., & Çamur, S., (2018). Değiştir & Gözle ve Artımsal İletkenlik Algoritmalarının EN 50530 Dinamik Verim Testine göre Performanslarının Deđerlendirilmesi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 22(1), 85-93.
- [12] Loukriz, A., Haddadi, M., & Messalti, S., (2016). Simulation and Experimental Design of a New Advanced Variable Step Size Incremental Conductance MPPT Algorithm for PV Systems, *ISA Transactions*, (62), 30-38.
- [13] Kandemir, E., Börekci, S., & Cetin, N.S., (2018). Comparative Analysis of Reduced-Rule Compressed Fuzzy Logic Control and Incremental Conductance MPPT Methods. *Journal of Electronic Materials*, 47(8), 4463-4474.
- [14] Al-Majidi, S.D. Abbod M.F., & Al-Raweshidy, H.S., (2018). A Novel Maximum Power Point Tracking Technique Based on Fuzzy Logic for Photovoltaic Systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, (43), 14158-14171.
- [15] Enany, M.A., Farahat, M.A., & Nasr A. (2016). Modeling and Evaluation of Main Maximum Power Point Tracking Algorithms for Photovoltaics Systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (58), 1578-1586.
- [16] Bay, O. F., & Ozarslan, M., (2009). Modeling and Simulation of Grid Connected-Three Phase Two Stage Photovoltaic System. *International Journal of Electrical Energy Systems*, 1(2), 55-63.
- [17] Büyükgüzel, B., (2011). Microcontroller Based Maximum Power Point Tracker for Solar Panels, *Çukurova University Institute and Applied Sciences*, Adana. 131s.
- [18] Kececioglu, Ö.F., & Kılıç, E., (2019). Tristör Kontrollü Reaktörün Sinirsel Bulanık Denetim Esaslı Reaktif Güç Kontrolü, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 7(2), 399-410.
- [19] Mohan, N., Undeland, T.M. & Robbins, W.P. (2007). Güç Elektronikleri, Çeviriciler, Uygulamalar ve Tasarım, *Literatür Yayıncılık* İstanbul.
- [20] Kececioglu, O.F., Gani, A., Kilic, E., Sekkeli, M., (2019). Dynamic Performance Evaluation of PI and Interval Type-2 Takagi-Sugeno-Kang Fuzzy Controller on Positive Output Luo Converter. *Natural and Engineering Sciences*, 4 (3), 32-39.