



INVESTIGATION OF MAXIMUM POWER POINT TRACKING METHODS IN PHOTOVOLTAIC SYSTEMS

Leyla Karagözoğlu^{*1} , Zeynep Bala Duranay¹ 

¹Firat University, Technology Faculty, Electrical Electronics Engineering Department, 23119, Elazığ, Turkey

Abstract

Original scientific paper

Photovoltaic systems are one of the popular renewable energy sources as an alternative to fossil sources. Output power and efficiency of photovoltaic systems vary depending on changing environmental conditions. Finding the maximum power point during these changes has been an important problem. Because, operating the system at maximum power has a significant impact on overall system efficiency. Therefore, photovoltaic systems should be operated around the maximum power point to increase both power drawn and their efficiency. There are numerous methods for controlling the maximum power point. As input variables in these methods, factors such as open circuit voltage, short circuit current, radiation intensity, wind speed, and module temperature can be used. Furthermore, the complexity, cost, stability, convergence, and other characteristics of these maximum power point tracking methods vary. It has a variety of properties. As a result, determining the best maximum power point tracking method to use during the system's design phase is critical. Maximum power point tracking methods are classified into four categories in this study: traditional, smart, optimization, and hybrid. The benefits and drawbacks of these methods are determined, and their basic equations are provided. When these methods are examined, it is seen that the system efficiency approaches 100% when smart, optimization and hybrid methods are used.

Keywords: Photovoltaic, maximum power, maximum power point, renewable energy.

FOTOVOLTAİK SİSTEMLERDE MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI İZLEME YÖNTEMLERİNİN İNCELENMESİ

Özet

Orijinal bilimsel makale

Fotovoltaik sistemler, fosil kaynaklara alternatif olan popüler yenilenebilir enerji kaynaklarından birisidir. Fotovoltaik sistemlerin çıkış gücü ve verimlilikleri değişen çevre koşullarına bağlı olarak değişmektedir. Değişen çevre koşullarına bağlı olarak fotovoltaik sistemin çıkış gücünde de değişim meydana gelmektedir. Bu değişimler sırasında maksimum güç noktasını bulmak önemli bir sorun oluşturmuştur. Çünkü sistemin maksimum güç noktasında çalıştırılması verimi büyük ölçüde etkilemektedir. Bu yüzden fotovoltaik sistemler verimliliklerinin artırılması için maksimum güç noktası etrafında çalıştırılmalıdır. Maksimum güç noktasının kontrolü için birçok yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemlerde giriş değişkeni olarak açık devre gerilimi, kısa devre akımı, ışınım şiddeti, rüzgar hızı, modülün sıcaklığı gibi faktörler kullanılabilir. Ayrıca bu maksimum güç noktası izleme yöntemleri karmaşıklık, maliyet, kararlılık durumu, yakınsama vb. birçok açıdan farklı özelliklere sahiptir. Bu nedenle sistemin tasarımı aşamasında kullanılacak maksimum güç noktası izleme yöntemi önem kazanmaktadır. Bu çalışmada maksimum güç noktası izleme yöntemleri geleneksel, akıllı, optimizasyon ve hibrit yöntemler olarak dört kategoride sınıflandırılmıştır. Bu yöntemlerin avantaj ve dezavantajları belirlenmiş ve temel denklemleri verilmiştir. Bu yöntemler incelendiğinde akıllı, optimizasyon ve hibrit yöntemler kullanıldığında sistem veriminin %100'e yaklaştığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Fotovoltaik, maksimum güç, maksimum güç noktası izleme, yenilenebilir enerji.

1 Giriş

Fotovoltaik (FV) sistemler, yüzeyine gelen güneş ışınlarını, doğrudan elektrik enerjisine çeviren sistemlerdir. Bu enerji dönüşümü içerisinde herhangi bir hareketli parça bulunmamaktadır. FV sistemler diğer adıyla güneş pilleri olarak da adlandırılırlar [1].

Fotovoltaik kelimesi, Yunancada ışık kelimesini ifade eden 'photo' ve elektrik alanındaki öncü mucitlerden biri olan 'Alessandro Volta' nın adından ilham alınarak oluşturulmuş, voltaj anlamına gelen 'voltaic' kelimesinin birleşmesinden meydana gelmiştir [2].

İlk defa 1839 yılında Fransız bir fizikçi olan Alexandre Edmond Becquerel tarafından yapılan

*Corresponding author.

E-mail address: leylakaragozogl@gmail.com (L. Karagözoğlu)

Received 27 November 2022; Received in revised form 17 March 2023; Accepted 18 March 2023

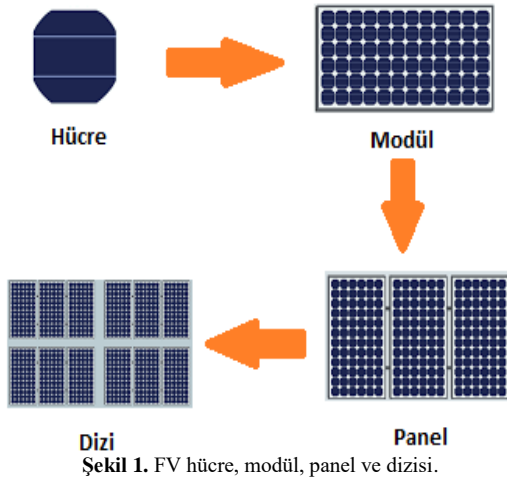
2587-1943 | © 2023 IJIEA. All rights reserved.

Doi: <https://doi.org/10.46460/ijiea.1210658>

deneyde, elektrolit içerisine daldırılan elektrotlar arası gerilimin, elektrolit üzerine düşen ışığa bağımlı olduğu gözlemlenerek, FV etkisi keşfedilmiştir [3].

Kare, dikdörtgen ve daire şeklinde biçimlendirilmiş yüzeylere sahiptirler. Yaygın olarak kullanılan silisyum güneş pillerinin alanları yaklaşık 100cm^2 ' dir ve kalınlıkları ise 0,2-0,4 mm arasında değişmektedir. FV sistemlerde verim güneş pilinin yapısına bağlı olarak %5-70 arasında değişmektedir [4].

Sistem çıkışındaki gücün artırılması amacıyla, güneş pilleri paralel ya da seri olarak bağlanmaktadır. Oluşturulan bu yapılar FV modül olarak adlandırılmaktadır. Şekil 1' de gösterildiği gibi FV hücreler birleşerek FV modülleri oluştururlar. FV modüller de seri veya paralel bağlanarak panelleri, paneller de birleştirilerek dizileri oluşturmaktadır [4, 5].



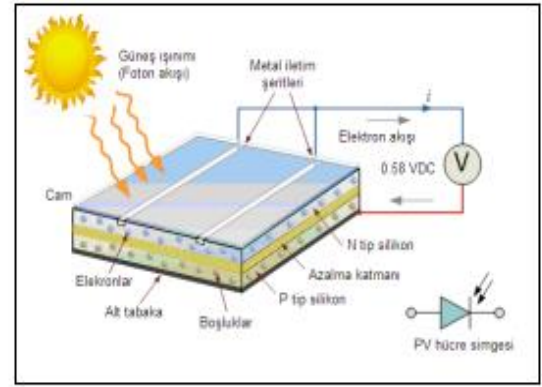
1.1 Fotovoltaik Sistemlerin Yapısı

Bu sistemlerin en küçük birimi güneş hücreleri olup, sistem yarı iletken malzemelerden meydana gelmektedir. Genellikle hücre yapımında silisyum (Si), amorf silisyum (a-Si), kadmium tellür (CdTe), bakır indiyum selenoid (CIS), bakır indiyum galyum selenoid (CIGS) yarı iletken malzemeler tercih edilmektedir [6, 7].

Bu malzemelerin tercihinde, verimlilik değeri önem arz etmektedir. Laboratuvar şartlarında, hücrelerin verim değerleri, kristal silikon %25, ince film teknolojisi %22 ve gelişmekte olan diğer hücreler %22 şeklindedir [8].

Bu yarı-iletken maddeler "n" ya da "p" tipi katkılandıktan sonra güneş pili olarak kullanılabilir. Şekil 2' de gösterilen güneş pillerinde, tercih edilen katkı maddeleri, saf yarı iletken eriyik içine ayarlı bir şekilde ilave edilerek katkılama işlemi gerçekleştirilir.

Katkı maddesi ile elde edilecek olan yarı-iletken maddenin "n" ya da "p" tipi olması belirlenmektedir. Güneş pillerinde yaygın olarak kullanılan silisyum maddesinden n tipi silisyumu oluşturmak için periyodik cetvelin 5. grubundaki bir element (fosfor, vs.) silisyum erisine eklenmektedir. Silisyum ve fosfor elementleri, dış yörüngelerinde sırasıyla 4 ve 5 elektron bulundurmaktadır. Fosfor elementi fazla olan bir elektronunu kristal yapıya vermektedir. Bu sebeple 5.grup elementlerine "verici" ya da "n tipi" katkı maddesi denilmektedir.



Silisyum erisine 3. grup elementlerinden (alüminyum, indiyum, bor vs.) biri ilave edildiğinde p tipi silisyum oluşmaktadır. 3. grup elementlerinin dış yörüngelerinde 3 elektron olduğu için kristalde bir elektron eksik olarak bulunur. Bu durumdaki elektron eksikliği hol ya da boşluk olarak adlandırılmaktadır ve pozitif yük taşıdığı varsayılmaktadır. Bu sebeple 3. grup elementlerine "alıcı" veya "p tipi" katkı maddesi denilmektedir.

"p" veya "n" tipi ana malzemeye, ihtiyaç duyulan katkı maddesinin eklenmesiyle yarı iletken eklemler oluşmaktadır. Çoğunluk taşıyıcıları, "n" tipi yarı iletken elektronlar, "p" tipi yarı iletken hollerdir. Başlangıçta p ve n tipi yarı iletken maddeler elektriksel bakımdan nötrdür.

Pn eklemi oluştuğunda, n tipi çoğunluk taşıyıcıları, p tipi çoğunluk taşıyıcılarına doğru akım oluşturmaktadır. Yük dengesinin oluşmasına kadar, her iki alanda da bu olay devam etmektedir. Pn tipi maddenin eklem bölgesinde, yani ara yüzeyinde p bölgesinde negatif yük birikirken, n bölgesinde pozitif yük birikmektedir. Bu eklem bölgesine "yükten arındırılmış bölge" veya "geçiş bölgesi" denilmektedir. Bu geçiş bölgesindeki elektrik alanı ise "yapısal elektrik alan" denilmektedir. Eklem bölgesinde FV dönüşüm sağlanarak yarı iletken eklem, güneş pili olarak çalıştırılmaktadır [10, 11].

FV dönüşüm iki aşamada gerçekleşmektedir. İlk olarak eklem bölgesi üzerine düşen ışık, elektron-hol çiftlerinin oluşmasını sağlamaktadır. Daha sonra ise bu elektron-hol çiftleri, bölgedeki elektrik alan sayesinde birbirinden ayrılmaktadır [12].

1.2 Bağlantı Şekline Göre Fotovoltaik Enerji Üretim Sistemleri

Şebekeye bağlanma durumlarına göre fotovoltaik elektrik enerjisi üretim sistemleri, şebeke bağlantılı ve şebekeden bağımsız olmak üzere iki şekilde gerçekleştirilmektedir.

Şebeke bağlantılı fotovoltaik sistemler, şebeke hatlarına yakın olan alanlarda kullanılmakta olup, güneş enerjisinden elde edilen elektrik enerjisi, mevcut elektrik şebekesine aktarılarak, sisteme katkı sağlanır.

Şebekeden bağımsız fotovoltaik sistemler ise, şebekeye erişim sağlanamayan bölgelerde, elektrik enerjisi ihtiyacının karşılanması amacıyla kullanılmaktadır.

Her iki fotovoltaik sistemde de, güneşten gelen fotonların, fotovoltaik panellere ulaşması ile DA enerji üretilir.

Şebeke bağlantılı sistemlerde, üretilen bu enerji inverterler yardımı ile AA güce çevrilip, şebekeye aktarılmaktadır.

Şebekeden bağımsız sistemlerde ise, üretilen enerji, şarj kontrol cihazı üzerinden akülerde DA olarak depolanmakta ve ihtiyaç duyulduğunda, inverter yardımı ile AA'ya dönüşürülerek kullanılmaktadır.

1.3 Fotovoltaik Panellerin Performansın Etkileyen Faktörler

FV sistemler, güneş enerjisinden elektrik enerjisinin üretilmesinde kullanılmaktadırlar. Bu sistemlerin performansı çevresel koşullara bağımlı olarak değişkenlik göstermektedir. FV sistemlerin verimleri sıcaklık, konum, temizlik, bakım, yüzey parametresi, gölgelenme gibi faktörlere bağlı olarak değişmektedir.

Yarı iletken malzemenin güneş ışınlarıyla teması neticesinde, atom içerisindeki elektronlar serbest kalıp, elektrik akımına sebep olurlar. Fakat güneş ışınlarının elektrik enerjisine dönüştürülmesi, ışık fotonlarının yarı iletken geçiş bölgesine düşürülmesi ile sağlanır. Bu sebeplerden ötürü, panel yüzeyine ulaşan ışınların yansıtma oranı, diğer bir deyişle yüzey parametresi önemli bir faktördür [1].

FV panel sıcaklığı artınca, güneş pilinin kısa devre akımı artar. Sıcaklık artışı panel performansını etkileyip, yarı iletken enerji bant aralıklarının düşüşüne sebep olur ve devrenin gerilimi de düşer. Gerilim değerindeki düşüş akım değerindeki artıştan daha fazla olduğu için çıkış gücünde azalır [1, 13].

Dünyanın kendine has şekli nedeniyle dolayı güneş ışınlarının yüzeye geliş açısı, konuma bağlı olarak değişir. Güneş kendi etrafında dönerken, dünyaya gelen güneş ışınlarının, kuzey ve güney yarımkürelere bakan yönleri farklı olur. Kuzey yarımkürede yön güneye tarafken, güney yarımkürede yön kuzey tarafıdır.

FV panel yüzeyine güneş ışınlarının düşmesi ile enerji dönüşümü gerçekleşmektedir. Bu nedenle sistem performansı, FV panellerin güneş ışınlarına maruz kaldığı süre ile paralel bir şekilde olumlu etkilenecektir [14, 15].

FV sistemlerde, paneller güneş ışınlarını dik ve homojen alacak şekilde yerleştirildiğinde en iyi performans elde edilmektedir. Bu sebeple, panellerin yerleşim yeri önemli olmaktadır. Ayrıca gölgelenmeyi önlemek ve panellerin güneş ışınlarından daha fazla yararlanmasını sağlayabilmek için paneller arka arkaya ya da yan yana yerleştirilebilmektedir [16].

Ön yüzeyleri cam olan FV sistemler rüzgar, yağmur, kar gibi kötü hava koşullarından etkilenirler. FV sistem yüzeyinde farklı çevresel koşullara bağlı olarak oluşan toz ve kirler, FV panelin güneş ışınlarından yararlanma alanını azaltmaktadır. Bu nedenle sistemde gölgelenme etkisi görülmektedir ve bu gölgelenmenin sisteme negatif etkisi bulunmaktadır [17, 18].

FV sistem performansının, hem FV panel yüzeyine düşen güneş ışınlarının miktarına, hem de bu ışınların geliş açısına bağlı olarak değiştiği yapılan çalışmalarda gözlemlenmiştir. Yapılan çalışmalarda, güneş ışınlarının FV panel yüzeyine dik açı ile düştüğü durumlarda,

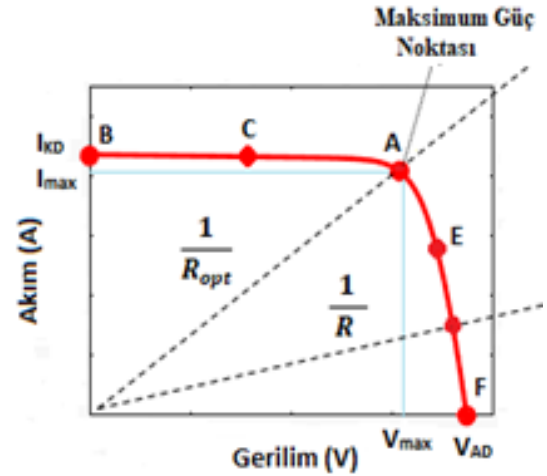
sistemden en yüksek üretim sağlanmaktadır. Bu yüzden, sistem performansını artırmak amacıyla FV panel yüzeyine düşen güneş ışınlarının dik olacak şekilde yönlendirilmesi gerekir. Fakat devamlı bir hareket halinde olan güneş ışınlarının, panel yüzeyine dik konumlandırılması mümkün olmamaktadır. Bu yüzden güneş takip sistemleri geliştirilmiştir.

Güneş takip sistemleri, güneşin konumunu takip eden ve FV panel yüzeyine düşen güneş ışınlarının, sürekli dik açıyla tutulmasını sağlayan sistemlerdir.

Bu çalışmada, panel performansını etkileyen parametreler göz önüne alınarak, güneş ışınından yüksek seviyede fayda elde edebilmek için kullanılan çeşitli maksimum güç noktası izleme yöntemleri (MGNİ) incelenerek, bu yöntemlerin avantaj ve dezavantajları ortaya konulmuştur. Böylece, tasarlanacak sisteme uygun MGNİ tekniğinin belirlenmesine katkı sağlanmış olacaktır.

2 Maksimum Güç Noktası

Bölüm 1.1' de bahsedildiği gibi, güneş ışımında FV sistem uçlarında pozitif bir potansiyel fark oluşmaktadır ve sistem pozitif bir akım verebilmektedir. FV panel uçlarına bir değişken direnç yükü bağlanırsa, bu yükün çalışma noktası, karakteristik eğrinin üzerinde olur. Şekil 3' de gösterilen FV panel karakteristik eğrisinin eğimi $I/V=1/R$ olmaktadır ve yüke aktarılan gücün miktarı yalnızca yük direncine bağlı olarak değişmektedir [19].



Şekil 3. FV modül akım-gerilim karakteristiği.

FV panelin akım-gerilim karakteristiğinde, R direncinin küçük olduğu değerlerde, FV sistem B-C noktaları arasında sabit bir akım kaynağının davranışını göstererek çalışmaktadır. R direncinin çok büyük olduğu değerlerde ise, FV sistem E-F noktaları arasında sabit bir gerilim kaynağının davranışını göstererek çalışmaktadır [20].

FV sistemlerde modül için en verimli çalışma noktası A noktasıdır. A noktası MGN olarak adlandırılmaktadır. MGN' da çalışma durumunda, panelden elde edilen verim de maksimum olmaktadır. Denklem 1' de sistemden çekilen MG değerinin akım ve gerileme bağlı denklemi gösterilmiştir.

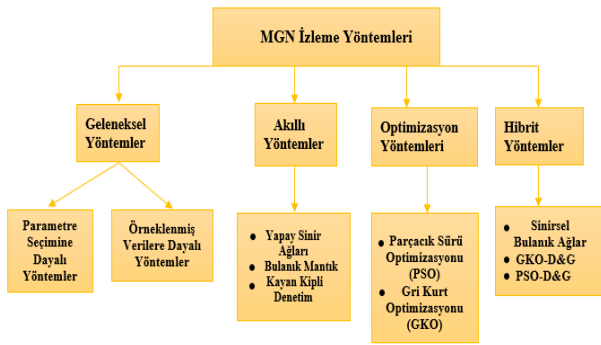
$$P_{max} = I_{max} \cdot V_{max} \quad (1)$$

3 Maksimum Güç Noktası İzleme Yöntemleri

Bir FV sistemin çıkış karakteristiği doğrusal değildir. FV panellerin maksimum güç noktası, Bölüm 1.2' de bahsedildiği gibi, FV güç üretim sistemlerinin verimliliklerini düşürmektedir. Yükün çalışma noktası, çevresel koşullara bağlı olarak değiştiği için, daima FV sistemin maksimum güç noktasını göstermemektedir. Yükün talep ettiği gücü sağlamak için, FV sistemlerde gerekenden fazla modül içeren sistem tasarlanmaktadır. Bu ise FV sistemin maliyetini artırmaktadır ve önemli miktarda enerji kayıplarına neden olmaktadır.

Hem bu olumsuzluğu gidermek hem de sistem çıkışında yüksek verim almak için, FV panel maksimum güç noktasında çalıştırılmalıdır. Belirli şartlar altında FV sistemden maksimum güç elde etmeyi sağlayan ve şarj kontrol cihazlarına dahil edilen algoritmalar ile sistem maksimum güç noktasında çalıştırılabilmektedir. Bu amaçla MGNİ yöntemleri kullanılmaktadır. MGNİ yöntemi, FV sistemin gerilim ve akımını izleyerek çıkış gücünü kontrol etmek amacıyla kullanılmaktadır [20, 21].

FV çıkış gücünü maksimum yapmak ve üretim verimliliğini iyileştirmek için Şekil 4' de gösterildiği gibi birçok farklı MGNİ yöntemi bulunmaktadır.



Şekil 4. Bazı MGNİ yöntemlerinin basitleştirilmiş sınıflandırılması.

3.1 Geleneksel MGNİ Yöntemleri

Yaygın olarak kullanılan, geleneksel MGNİ yöntemleri parametre seçimine dayalı kontrol yöntemleri ve örneklenmiş verilere dayalı kontrol yöntemleri olmak üzere iki sınıfta incelenmektedir.

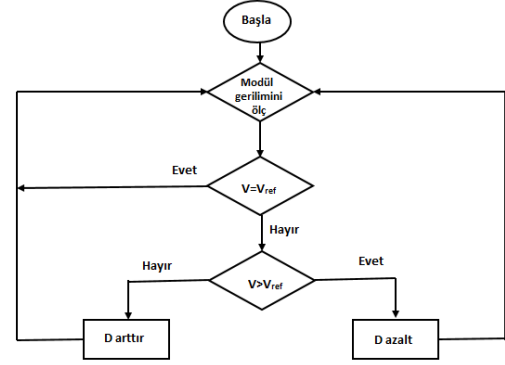
3.1.1 Parametre Seçimine Dayalı Yöntemler

Bir FV panelin kendine özgü fiziksel parametreleri, ışınlama ve çalışma sıcaklığı ölçümleriyle birlikte, optimize edilmiş bir matematiksel modelin kurulmasına izin vermektedir. Bu tür modeller, belirli çalışma koşullarında, panelin P-V ve I-V karakteristik eğrilerinin tahminini sağlamaktadır. Böylece maksimum güç noktasını da belirlemektedir. Bu kategorideki kontrol yöntemlerinden bazıları, sabit gerilim algoritması, açık devre gerilim algoritması, kısa devre akım algoritması vb. dir [22].

3.1.1.1 Sabit Gerilim Algoritması

Bu algoritma, MGNİ' yi izlemede kullanılan en basit kontrol yöntemlerinden biridir. Panel gerilimine ait geri besleme ile sabit bir referans gerilim (V_{ref})

karşılaştırılması sonucu oluşan sinyal, FV modülün çalışma noktasını MGN yakınında tutabilmek için DA-DA dönüştürücünün görev oranını ayarlamaktadır. Burada kullanılan referans gerilim değeri, modülün maksimum gerilim değerine ya da hesaplanmış en iyi sabit gerilim değerine eşit olabilecek şekilde ayarlanmaktadır. Bu yöntemlerde, maksimum güç noktasının, açık devre geriliminin %72-78 aralığında olması sağlanmaktadır [23]. Şekil 5' de sabit gerilim algoritmasının akış diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 5. Sabit gerilim algoritmasının akış diyagramı [23].

Denklem 2' de referans gerilim değerinin K_c ve V_{oc} değerleri ile olan bağlantısı gösterilmiştir. Burada K_c değeri 0.72-0.78 arasında değişen, panelin özelliklerine bağlı bir katsayıdır, V_{oc} ise açık devre gerilimini ifade etmektedir.

$$V_{ref} = K_c \times V_{oc} \quad (2)$$

$V=V_{ref}$ oranını ayarlayabilmek için K_c ve V_{ref} değerleri bir örnekleme periyodu boyunca hesaplanmaktadır ve sabit tutulmaktadır. Daha sonraki örneklemede tekrar V_{oc} ölçülmekte ve her ölçümde aynı işlem tekrarlanmaktadır. Bu yöntemin avantajı basit olmasıdır. Ayrıca yalnızca bir geri besleme kontrolü gerekmektedir [24].

Sabit gerilim algoritması, özellikle büyük sıcaklık değişimlerinde, etkili bir şekilde MGN' ye ulaşamaz [22].

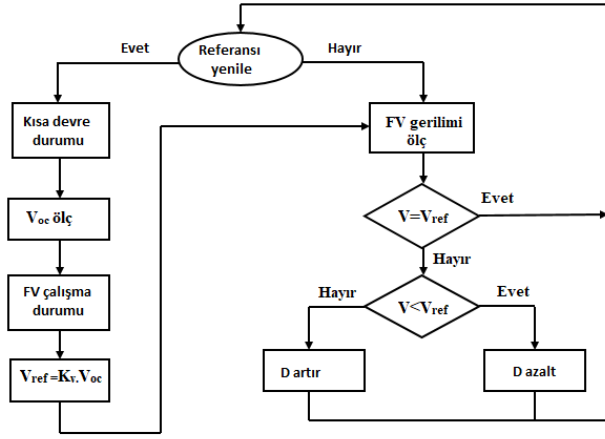
3.1.1.2 Açık Devre Gerilim Algoritması

FV panel geriliminin, sistemin MG gerilimine (V_{mg}) karşılık gelen referans gerilim değeri ile karşılaştırılmasıyla açık devre gerilim takibi gerçekleşmektedir. Burada gerilimin hatası, dönüştürücüde görev oranını kontrol etmek amacıyla kullanılmaktadır.

Denklem 3' de V_{mg} değerinin FV panelin açık devre gerilimi V_{oc} ile olan bağlantısı verilmektedir [8].

$$V_{mg} = K_v \times V_{oc} \quad (3)$$

Burada K_v panelin özelliklerine bağlı değişen bir katsayı olup, değeri 0.71 ve 0.78 aralığında değişmektedir. Hızlı takip etme özelliğine sahip bu yöntemin farklı hava şartlarındaki performansı zayıf kalmaktadır [22]. Şekil 6' da açık devre gerilimi algoritmasının akış diyagramı verilmiştir.



Şekil 6. Açık devre geriliminin akış diyagramı [22].

3.1.1.3 Kısa Devre Akım Algoritması

FV panelin kısa devre akımı I_{sc} , çevresel koşullara bağlı olarak değiştiğinde, panelin MGN akımı I_m yaklaşık olarak I_{sc} ile doğrusal olarak değişmektedir. Denklem 4' te I_m akımı ve I_{sc} 'e akımı arasındaki doğrusal ilişki gösterilmiştir.

$$I_m = K_1 \times I_{sc} \quad (4)$$

Burada K_1 sabiti 1'den küçük bir değer olup, sıcaklık değerinden çok az etkilenmektedir. Literatürdeki K_1 değerleri 0.92 ile 0.94 arasında değişmektedir ve farklı FV paneller için bu değer farklı olmaktadır [25].

3.1.2 Örneklenmiş Verilere Dayalı Kontrol Yöntemleri

Bu kategorideki yöntemler, maksimum güç noktasını, FV panelden aldığı gerilim, akım ve güç gibi örneklenmiş verileri kullanarak izlemektedir. Bu yöntemler, herhangi bir FV modele dayanmaz ve pratikte uygulanması basittir. Bu yüzden yaygın olarak kullanılmaktadır.

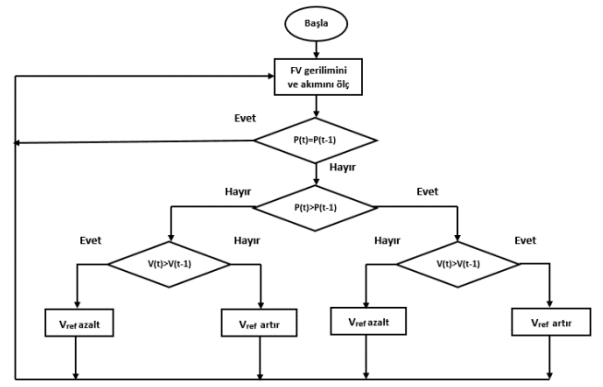
Örneklenmiş verilere dayalı kontrol yönteminde en yaygın kullanılan algoritmalar, değiştir gözle ile artan iletkenlik algoritmasıdır [22, 26]. Genellikle bu yöntemler izleme doğruluğunu ve hızını daha da iyileştirmek için çeşitli akıllı algoritmalarla birleştirilmektedir.

3.1.2.1 Değiştir Gözle Algoritması

Değiştir Gözle (D&G) yönteminde ilk olarak güneş panelinin gerilimi ve akımı ölçülmekte ve buna bağlı olarak panel gücü (P_1) hesaplanmaktadır. Daha sonraki aşamada, gerilim değerindeki ya da görev oranındaki (D) küçük değişimler göz önünde bulundurularak yeniden güç (P_2) hesabı yapıp, hesaplanan P_1 ve P_2 güç değerleri birbiriyle karşılaştırılmaktadır.

Eğer P_2 gücü, P_1 gücünden daha büyükse, güç eğrisinin üzerinde hareket P_2 gücü tarafında devam edecektir. Fakat P_2 gücü, P_1 gücünden küçükse, bu durumda hareket ters yönde olacaktır.

Bu şekilde panele ait MGN (P_{mgn}) ve MGN' ye karşılık gelen gerilim (V_{mgn}) hesaplanmaktadır [26]. Şekil 7' de D&G algoritmasının akış diyagramı verilmiştir.



Şekil 7. D&G algoritmasının akış diyagramı [26]

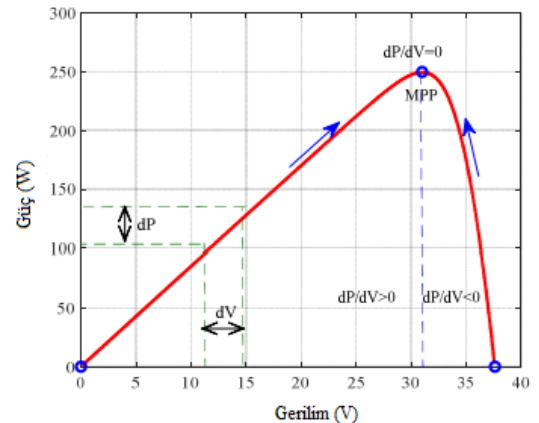
D&G yöntemi, hızlı değişen atmosferik şartlar altında (örneğin parçalı bulutlu bir havada), sapma gösterebilmektedir. Bu sapmanın nedeni, güç eğrisinin ani değişimlerinde yöntemin hareket yönünün bir önceki durum için seçilmiş olmasıdır. Bu nedenle eğri değişim gösterdikçe seçilen yön geçerliliğini yitirmektedir [26, 27].

D&G yönteminin diğer dezavantajı ise, MGN' nin gerçek yerinin belirlenememesidir. Ayrıca çalışma noktası, MGN' ye yakın bir yerde salınım yapmaktadır [26].

3.1.2.2 Artan İletkenlik Algoritması

Bu yöntemin çalışma prensibi FV panel çıkış gücünün, çıkış gerilimine göre türevinin sıfır olduğu noktanın MGN olduğu prensibine dayanmaktadır [8]. Şekil 8' de artan iletkenlik algoritmasına ait eğri gösterilmektedir. Şekil 8' de görüldüğü gibi türevin sonucu sıfırdan büyük ise ($dP/dV > 0$), sistemin o anda çalışma noktası MGN' nin sol tarafında bulunmaktadır. Türevin sonucu sıfırdan küçük olduğunda ise ($dP/dV < 0$), sistemin çalışma noktası, MGN' nin sağ tarafında bulunmaktadır [28].

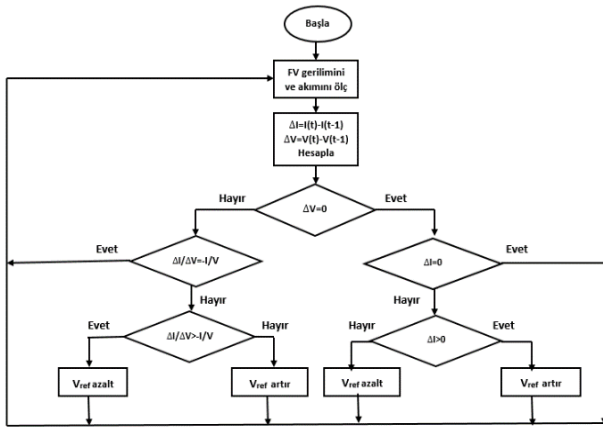
Artan iletkenlik algoritması, I/V değişimi ilkesine göre çalışmaktadır. Bu yöntemde, ölçülen anlık gerilim ve akım değerleri önceki gerilim ve akım değerleri ile karşılaştırılmaktadır. Anlık iletkenlik (I/V) ile elde edilen artan iletkenlik ($\Delta I/\Delta V$) değeri karşılaştırılır ve MGN yakalanmaya çalışılır. Anlık iletkenliğin (I/V), artan iletkenliğe ($\Delta I/\Delta V$) eşit olduğu durumda MGN' ye ulaşılmış olur.



Şekil 8. Artan iletkenlik algoritmasının temel çalışma prensibi [28].

Algoritma, $\Delta I/\Delta V < -I/V$ durumunda MGN' nin sağında çalışmaktadır. Çalışma noktasını MGN' ye doğru hareket ettirebilmek amacıyla, çalışma geriliminde azaltma yapılmaktadır. $\Delta I/\Delta V > -I/V$ durumunda ise, algoritma MGN' nin solunda çalışmaktadır. Çalışma gerilimi artırılarak, MGN' ye doğru hareket amaçlanır. Panel çalışma gerilimi, yalnızca MGN' ye ulaşıldığında herhangi bir değişikliğe gerek duymaz.

Artan iletkenlik yöntemi, hızlı değişen çevre koşullarında, D&G yönteminden daha yüksek hassasiyete sahiptir. Bu yöntemin dezavantajı ise, kontrol devresinin diğer algoritmalara göre daha karmaşık yapıda olmasıdır [22-24]. Artan iletkenlik algoritmasının akış diyagramı Şekil 9' da gösterilmektedir.



Şekil 9. Artan iletkenlik algoritmasının akış diyagramı [23].

3.2 Akıllı MGNİ Yöntemleri

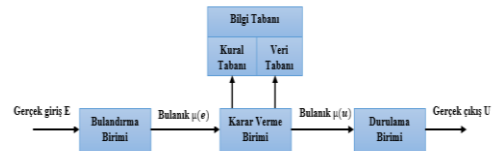
Bir FV panelin P-V karakteristik eğrisi doğrusal olmayıp, sıcaklık ve ışınlama ile değişmektedir. Dolayısıyla çevresel değişimler nedeniyle karakteristik eğrisi çoklu tepe noktaları sergileyebilir.

Bölüm 3.1' de bahsedilen Geleneksel MGNİ yöntemleri, düşük yakınsama hızına sahiptir ve çevresel koşulların ani değişiminde dinamik cevabı yavaştır [8]. Bu nedenle, Geleneksel MGNİ yönteminin bu dezavantajı ile başa çıkmak için, MGNİ yöntemleri akıllı algoritmalar ile birlikte önerilerek, uygulanmıştır. Bu yöntemler arasında bulanık mantık, yapay sinir ağları, kayan kipli denetim vb. yer almaktadır [22].

3.2.1 Bulanık Mantık Yöntemi

Bulanık mantık yöntemi, bir dizi bulanık kurala dayanan, yapay zeka algoritmasının yaygın bir türüdür. Karmaşık olan problemlerin matematiksel olarak ifade edilmesi zordur. Bulanık mantık yönteminde matematiksel modelin kesinliğe ihtiyacı yoktur. Sisteme uzman kararları dahil edildiği için avantaja sahiptir. Bu yüzden, bulanık mantık yöntemi, sistem modellerinin karmaşık ve kolayca elde edilemediği uygulamalarda kullanılmaktadır [29].

Şekil 10' da bulanık mantık kontrolör blok diyagramı gösterilmiştir. Şekil 10' da görüldüğü gibi bir bulanık sistem bulandırıcı, kural tabanı, çıkarım mekanizması ve durultucu bölümlerinden oluşmaktadır.



Şekil 10. Bulanık sistem blok diyagramı.

Bulanık mantık kontrolörün temel özelliği, uzman deneyimi ve sistem kontrolü için dilsel kuralları içeren bilgiyi bir araya getirmektir. Ayrıca bulanık mantık kontrolör, MGN' yi hızlı izleyebilir ve sabit koşullarda MGN' ye ulaştıktan sonra dalgalanma olmaz, yani daha iyi dinamik ve kararlı durum performansına sahiptir. Fakat ışınım değiştiğinde sapmaya neden olması ve uygulamasındaki karışıklık bulanık mantık kontrolörün başlıca dezavantajlarıdır. Bunun yanında, Bulanık küme tanımlamaları, üyelik fonksiyonunun şeklinin belirlenmesi ve kural tablolarının geliştirilmesi (doğruluk ve izleme hızını doğrudan etkileyen) için deneyim ve önsezi gerektirmektedir [22].

3.2.2 Kayan Kipli Denetim

Maksimum güç noktası takibinde kullanılan tekniklerden biridir. Bu teknikte sistem durum yörüngesi kayma veya anahtarlama yüzeyi olarak adlandırılan bir yüzeye doğru yönlendirilir. Uygun anahtarlama ile bu yüzey etrafında tutulur [30].

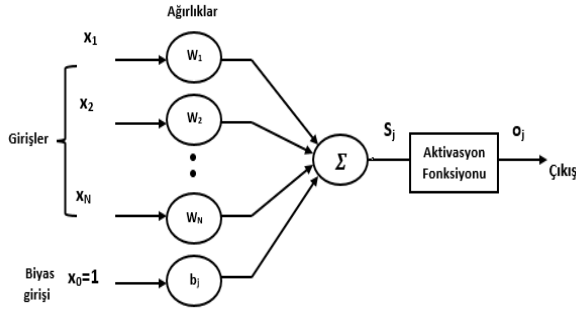
3.2.3 Yapay Sinir Ağları

Yapay sinir ağları (YSA), insan beyninin işleyiş şekline ilham alınarak oluşturulmuş bir bilgisayar programıdır. Beynin çalışma şeklinin yapay olarak modellenmesi sonucunda ortaya çıkmış ve geliştirilmiştir. Bir FV sisteme uygulandığında ağırlıklar ve sapmaları gibi değişkenleri eğitmek için birçok girdi ve çıktı verisi örneği kullanılmaktadır [31].

Genellikle YSA model seçimi, işlev tahmini, veri sınıflandırma ve en uygun değeri bulma gibi işlerde başarılı olmaktadır. Model seçiminde verimsiz olan geleneksel bilgisayarlar ise yalnızca algoritma ile ilgili hesaplamalarda ve kesin aritmetik işlemlerde hızlı olmaktadır [32]. Bilgi yorumlama ve bilgi sınıflamanın bulunduğu farklı problemlerin çözümlerinde YSA kullanılabilmektedir. YSA sistem kontrolü ve modelleme, ses, el yazısı, parmak izi ve elektrik işareti tanıma, meteorolojik yorumlamalar, otomatik araç denetimi ve fizyolojik işaretleri izleme gibi bazı alanlarda kullanılmaktadır [33].

YSA' nın yapısı, biyolojik sinir ağlarının yapısıyla doğrudan benzerlik göstermektedir. YSA temel olarak girişler, ağırlıklar, toplama işlevi, etkinlik (aktivasyon) işlevi ve çıkış işlevinden oluşmaktadır [34].

Yapay sinir hücresinde giriş sinyalleri, sürekli değişken veya ayrık darbe biçiminde olabilmektedir. Şekil 11' de görüldüğü gibi her bir giriş sinyali bir kazanç veya ağırlık ile çarpıldıktan sonra toplayıcı düğümde giriş sinyallerinin ve biyas sinyalinin toplamı alınmaktadır ve bir aktivasyon fonksiyonu boyunca çıkışa aktarılmaktadır [35].



Şekil 11. Yapay sinir hücresinin temel bileşenleri.

Denklem 5’ de görüldüğü gibi bir j’nci sinir hücresinin çıkışı matematiksel olarak şu şekilde ifade edilmektedir;

$$S_j = \sum_{i=1}^N w_{ji}x_i + b_j \quad (5)$$

Burada N, toplam giriş sayısını, w_{ji} çıkış sinir hücresi j ile önceki katmandaki x_i çıkış sinyaline sahip olan i’nci sinir hücresi arasındaki ağırlık değerini, b_j ise bias terimini göstermektedir. Aktivasyon fonksiyonunun uygulanması ile j’ nci sinir hücresinin çıkışı, Denklem 6’ da ifade edilmektedir;

$$o_j = f_j(S_j) = f(S_j) \quad (6)$$

YSA’ nın giriş değişkenleri, FV panelin kısa devre akımı ve açık devre gerilimi gibi değerler olabildiği gibi ışınım ve sıcaklık değerleri de kullanılabilir. Sistemin maksimum güç noktasında çalışması için çıkış ise, yükseltici dönüştürücünün yarı iletken anahtarın sinyalinin görev oranı ya da bir veya daha fazla referans sinyal olabilmektedir.

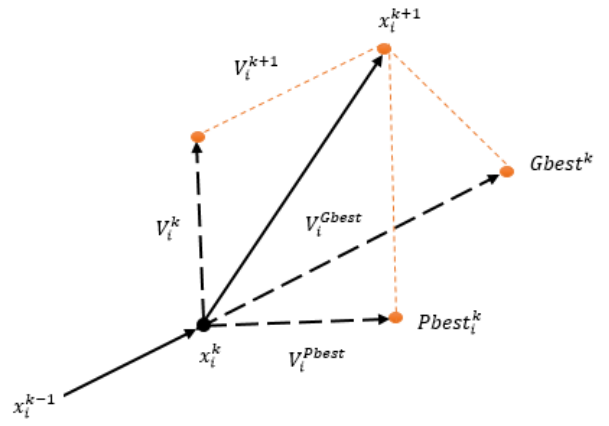
YSA’ nın eğitimi ve gizli katman algoritmaları, MGN’ yi yakalamada etkilidir [26].

3.3 Optimizasyon Yöntemleri

Optimizasyon yöntemleri, dinamik çevresel koşullarda doğru MGN’ yi arama için uygundur. Bu yöntemlerin uygulanması düşük maliyetli mikrodenetleyiciler yardımıyla daha da kolaylaşmaktadır.

3.3.1 Parçacık Sürü Optimizasyon (PSO) Algoritması

Parçacık Sürü Optimizasyon (PSO) algoritması 1995 yılında Eberhart ve Kennedy tarafından kuş ve balık sürülerinin davranışlarından ilham alınarak geliştirilmiş olan bir optimizasyon algoritmasıdır. PSO algoritması, sürü zekasının kullanıldığı bir sürü tabanlı algoritmadır. Bireyler arasında sosyal bilgi paylaşımının gerçekleştiği bu algortmada, her bir bireye parçacık ve bu parçacıklardan meydana gelen popülasyona da sürü denilmektedir. Bir parçacığın hız ve konumu bulunarak algoritma içerisindeki en uygun çözüm elde edilmektedir [36]. Şekil 12’ de PSO algoritmasının parçacık hareketi gösterilmiştir.



Şekil 12. PSO algoritmasının parçacık hareketi.

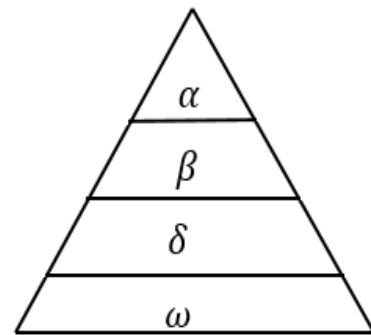
Burada i bireyi (parçacığı), k iterasyonu, x konumu, V hızı, G_{best} sürüdeki en iyi konuma sahip parçacığı ve P_{best} kişisel en iyi konumunu ifade etmektedir.

Parçacıklar ilk olarak rastgele hız ve pozisyon değerleri ile aramaya başlamaktadır. Daha sonra bu parçacıklar güncellenerek en uygun değer bulunmaya çalışılmaktadır. Her bir iterasyonda farklı hızlarda en iyi çözümü bulabilmek için parçacıklar arama alanında hareket etmektedir ve uygunluk fonksiyonuna göre değerlendirilmektedir [37].

3.3.2 Gri Kurt Optimizasyon Algoritması

Gri kurt optimizasyon (GKO) algoritması, Mirjalili ve arkadaşları tarafından önerilmiş bir sürü tabanlı optimizasyon algoritmasıdır. Bu algoritma, gri kurtların avlanma davranışları taklit edilerek geliştirilmiştir.

İterasyon sayısı ve popülasyon büyüklüğünün kontrol parametresi olarak kullanıldığı bu algortmada, dört çeşit kurt bulunmaktadır. Bunlar alfa, beta, delta ve omega olarak adlandırılmaktadır. Şekil 13’te gri kurt algoritmasının hiyerarşisi gösterilmektedir.



Şekil 13. GKO algoritmasının hiyerarşisi.

Alfalar, en iyi çözüm olarak bilinen gruptur [38, 39]. Alfa grubundakiler genellikle avlanma, uyuma ve uyanma zamanları gibi olayları belirlemekle sorumludurlar. Sürüyü organize etmek ve disiplinini sağlamak, sürünün gücünden daha önemlidir. Bu nedenle alfaların sürüdeki en güçlü üye olması değil, sürüyü en iyi şekilde yönetmesi gerekmektedir.

Betarlar ise sürü faaliyetleri içerisinde alfalara yardımcı olmaktadır. Betalar, alfaların komutlarını

uygularken geri bildirim yaparlar. Betalar, alfalardan birinin ölmesi veya yaşlanması halinde en iyi alfa adaydır [40].

Bu algoritmada en iyi çözüm alfa, ikinci beta, üçüncü delta ve dördüncü omega olarak kabul edilmektedir.

3.4 Hibrit Yöntemler

MGNİ için hibrit yöntemlerin oluşturulması, iki adımda gerçekleşir. İlk aşamada MGN değeri için tahmin yapılırken, ikinci adımda deyim yerindeyse ince ayar yapılarak MGN geliştirilir. Yani, ilk olarak geleneksel yöntemler, P-V eğrisinde MGN' nin yerini belirlemek için kullanılır. Bu aşamada ayar noktası MGN' ye yakın yapılır. İkinci aşamada ise, gelişmiş teknikler kullanılarak gerçek MGN' ye ulaşılmaktadır.

3.4.1 Sinirsel Bulanık Ağlar Yöntemi

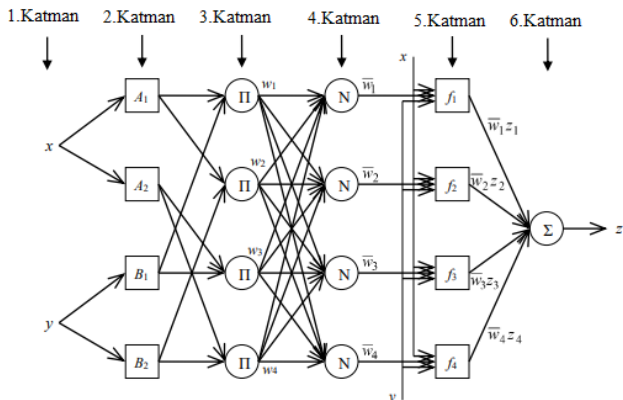
Sinirsel bulanık ağlar, hem YSA hem de bulanık mantıktan yararlanılarak oluşturulmuş hibrit sistemdir.

Bu sistemler, bulanık mantık uzman bilgisi kullanılarak sonuç çıkarma yeteneği ile YSA' nın paralel hesaplama ve öğrenme kabiliyetinin birleşmesinden oluşmuştur.

Sinirsel bulanık ağlar yöntemi tarafından problem için oluşturulmuş yapıda, bütün kurallar atanabilmekte veya bu kuralların veriler aracılığıyla uzman tarafından belirlenmesi sağlanmaktadır. Bu ise sistemin uzman görüşlerinden faydalandığını göstermektedir. Bu sayede sinirsel bulanık ağlar yöntemi, problemin tahmin aşamasında kullanılan YSA' ya uzman görüşlerinden yararlanma imkanı sağlayarak, ortalama kare hata kriterine göre daha iyi sonuç elde edilmesini sağlamaktadır [41].

Sinirsel bulanık ağlar yöntemi en küçük kare yönteminin geri yayımlı öğrenme algoritmasıyla beraber kullanılmasıyla oluşmuş hibrit bir yöntemdir.

FV sistemin MGN takibinde, sinirsel bulanık ağlar yöntemi, bulanık mantık yöntemine göre daha az salınım yapmaktadır ve daha hızlı sonuca ulaşmaktadır [42].



Şekil 14. Sinirsel bulanık ağlar yönteminin mimari yapısı

Bu sistemin sahip olduğu daha az matematiksel hesaplama, belirgin verimlilik ile tasarımı daha basit hale getirilmektedir. Bu yöntem özellikle FV sistem kararlılığını koruyarak şebekeye entegre edildiğinden, iyi dinamik yanıtlara sahiptir [43].

3.4.2 GKO-D&G

Bu hibrit yöntem kısmi gölgeleme koşullarında iyi sonuç vermektedir. Bu algoritmada, bir kurdun konumu DA-DA dönüştürücünün görev oranını ifade etmektedir ve bu durumda da PI kontrolöre gerek kalmamaktadır. Dolayısıyla algoritmadaki hesaplama işlemi sadeleşmektedir [43, 44].

Kurt sayısının artırılması, daha yüksek MGN doğruluğu sağlamakta, fakat hesaplama yükünü de artırmaktadır. Bu nedenle, kurt sayısı hesaplama zamanını azaltmak için, genellikle üç olarak kabul edilmektedir.

Bu algoritma, MGN' yi salınım yapmadan takip etmektedir ve hızla değişen güneş ışınımlarında iyi performans göstererek yüksek verimliliğe ulaşmaktadır [44].

3.4.3 PSO-D&G

Klasik yöntemler kısmi gölgeleme koşullarında MGN' yi takip etmekte yetersiz kalmaktadır. PSO' nun D&G ile kombinasyonu, daha hızlı izleme algoritması ve daha basit bir mekanizma sağlamaktadır. Bu yöntem aynı zamanda kısmi gölgeleme koşullarında maksimum çıkış verimini sağlamaktadır. Geleneksel yöntemlerle kıyaslandığında daha iyi geçici performansa ulaşmaktadır [44, 45].

Bu yöntem PSO ile karşılaştırıldığında daha yüksek bir yakınsama hızına sahiptir ve izleme periyodundaki salınım süresini %70 oranında azaltmaktadır. Diğer hibrit algoritmalar ile karşılaştırıldığında ise bu yöntemin dezavantajı izleme süresidir [46].

4 Sonuç

Bu çalışmada dört farklı kategoriye ayrılan MGNİ yöntemleri incelenmiştir. Ayrıca farklı MGNİ teknikleri farklı parametreler dikkate alınarak literatür araştırması yapılarak sunulmuştur.

MGNİ algoritmalarının kullanılması sistem verimini etkileyen en önemli unsurdur. Bu nedenle sistemin tasarım aşamasında kullanılacak MGNİ algoritması önem kazanmaktadır.

Eşit dağılımlı ışınma koşullarında geleneksel yöntemlerin verimleri yüksektir. Ancak farklı ışınım koşullarında bu yöntemler düşük yakınsama hızına sahiptir ve dinamik cevapları yavaştır.

Akıllı yöntemler, matematiksel hesaplamalara bağımlı olmadan sistemi daha basit yapmaktadır. Ayrıca verilerin depolanabilip, algılanabilmesiyle izleme hızları artmaktadır. Bu yöntemler kısmi gölgeleme koşullarında MGN' yi izlemek için uygun tekniklerdendir.

Optimizasyon yöntemleri, değişen çevresel koşullarda MGN' yi izlemede FV sistemler ile uyumlu yöntemlerdir.

Hibrit teknikler, hesaplama yükünü önemli ölçüde azaltmaktadır ve bu tekniklerin izleme verimliliği yüksektir.

Sonuç olarak literatür verilerine göre, geleneksel yöntemler ile diğer (akıllı, optimizasyonlu ve hibrit) yöntemler kıyaslandığında; diğer yöntemlerin kullanıldığı MGNİ tekniklerinin veriminin %100'e yakın olduğu görülmektedir.

Bilgilendirme

Bu makale, Leyla Karagözoğlu' nun yüksek lisans tez çalışmasından üretilmiştir.

Gerçekleştirilen bu çalışmada Etik Kurul Onay belgesine gerek yoktur.

Referanslar

- [1] Karamanav, M. (2007). *Güneş Enerjisi ve Güneş Pilleri*. (Master's dissertation, Sakarya University).
- [2] Turhan, S. & Çetiner, İ. (2012) Fotovoltaik Sistemlerde Performans Değerlendirilmesi. 6. *Ulusal Çatı ve Cephe Sempozyumu 12-13 Nisan 2012, Uludağ Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi*. Görükle Kampüsü-Bursa
- [3] Arı, M., Bilgin, G., & Özcan, O. (2017). Alternatif Enerji Kaynaklarından Güneş Enerjisinin Günlük Hayatta Kullanılabilirliği ve Güneş Enerjisi ile Çalışan Piknik Sepeti Tasarımı. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Özel Sayı 1*,163-171
- [4] Esen, H. (2017). Fotovoltaik Paneller Kullanılarak Sisleme Sistemi ile Dış Ortamların Soğutulmasının Araştırılması. *Politeknik Dergisi*, 20 (2), 341-346
- [5] Polman A., and Atwater A., (2012). Photonic design principles for ultrahigh-efficiency photovoltaics. *Nature Materials*, 11, 174-177
- [6] Akman, E., & Karapınar, H. S. (2022). Electrochemically stable, cost-effective and facile produced selenium@ activated carbon composite counter electrodes for dye-sensitized solar cells. *Solar Energy*, 234, 368-376.
- [7] Gürgeç, E., Dıkıcı, A., & Aslan, F. (2022). Investigation of structural, electrical and photoresponse properties of composite based Al/NiO: CdO/p-Si/Al photodiodes. *Physica B: Condensed Matter*, 639, 413981.
- [8] Yasko, M. A. (2018). *Fotovoltaik Sistemlerde Düşürücü Tip DA-DA Dönüştürücülü Maksimum Güç Noktası İzleyicisinin Analizi, Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi*. (Master's dissertation, Koceli University).
- [9] Öztürk, H. H. (2019). *Güneş Enerjisinden Fotovoltaik Yöntemle Elektrik Üretiminde Güç Dönüşüm Verimi ve Etkili Etmenler*. Retrieved May 21, 2021 from www.emo.org.tr
- [10] Kayrı, İ. (2017). *Güneş Panelleri ile Üretilen Enerjinin Ortam Bilgileri Kullanılarak Yapay Sinir Ağlarıyla Tahmini*. (Doctoral dissertation, Fırat University).
- [11] Bilü, A. C. (2018). *Fotovoltaik Sistemlerin Fizibilitesi için Yeni Bir Arayüzün Geliştirilmesi*. (Master's dissertation, Yıldız Technical University).
- [12] Turmuş, A. (2018). *Düzlemsel Yansıma Destekli Güneş Paneli Tasarımı-Elektrik Üretimi ve Veri Analizi*. (Master's dissertation, Fırat University).
- [13] Atmaca, M., & Pektemir, İ. Z. (2020). Pv panel sıcaklığı üzerinde etkili olan atmosferik parametrelerin araştırılması. *International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences*, 32 (4), 458-466.
- [14] Duranay, M., Turmus, A., & Tanyıldızı, V. (2021). Experimental efficiency analysis of a solar panel electricity generation system using planar reflection. *IET Renewable Power Generation*, 15 (3), 521-531.
- [15] Geliş, K., Akyürek, E.F., & Yoladı, M. (2020). Panel konumu ve açısının fotovoltaik panel karakteristiği üzerine etkisi. *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 10 (3), 1899-1908.
- [16] Karagözoğlu, L., & Duranay, Z.B., (2021-April). Fotovoltaik Panel Performansını Etkileyen Faktörlerin İncelenmesi. *2nd International Baku Conference On Scientific Research* (pp. 218-228)
- [17] Jaszczur, M., Koshti, A., Nawrot, W., & Şedor, P. (2020). An investigation of the dust accumulation on photovoltaic panels. *Environmental Science and Pollution Research*, 27 (2), 2001-2014.
- [18] Rao, A., Pillai, R., Mani, M., & Ramamurthy, P. (2014). Influence of dust deposition on photovoltaic panel performance. *Energy Procedia*, 54, 690-700.
- [19] Onat, N., & Ersöz, S., (2009). Fotovoltaik Sistemlerde Maksimum Güç Noktası İzleyici Algoritmalarının Karşılaştırılması. *V. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu*,50-56
- [20] Köse, E. (2018). Fotovoltaik Sistemlerin Maksimum Güç Noktasında Çalıştırılması. *Dünya Multidisipliner Araştırmalar Dergisi 1* (2018), 8-27
- [21] Kurak, E., Erdemir, V., & Dursun, B. (2016). PV Sistemin İçin Maksimum Güç Noktası İzleyicisi Tasarım ve Uygulanması. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 4 (2016), 581-592
- [22] Mao, M., Cui, L., Zhang, Q., Guo, K., Zhou, L., & Huang, H. (2020). Classification and summarization of solar photovoltaic MPPT techniques: A review based on traditional and intelligent control strategies. *Energy Reports*, 6, 1312-1327
- [23] Verma D., Nema S., Shandilya A. M., & Dash S.K. (2016). Maximum Power Point Tracking (MPPT) Techniques: Recapitulation in Solar Photovoltaic Systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54 (16), 1018-1034.
- [24] Faranda R., & Leva S. (2008). Energy Comparison of MPPT Techniques for PV Systems. *WSEAS Transactions on Power Systems*, 3(6), 446-455
- [25] Güngör, O., & Özdemir, A. (2018). Güneş panellerinde IC ve ANFIS tabanlı mppt algoritmalarının karşılaştırmalı performans analizi. *Journal of Institute of Science and Technology*, 34 (2), 50-59.
- [26] Keskin, Y. E. (2014). *Fotovoltaik Sistemlerde Maksimum Güç Noktası İzleme Yöntemlerinin Karşılaştırılması*. (Master's dissertation, Koceli University).
- [27] Attalah M., Abdelaziz Y., & Jumah S. (2014). Implementation of Perturb and Observe MPPT of PV System with Direct Control Method using Buck and Buck-Boost Converters. *Emerging Trends in Electrical, Electronics & Instrumentation Engineering*, 1(1), 31-44
- [28] Duranay, Z.B., & Guldemir, H., (2021). Fuzzy Logic Based Maximum Point Tracking for Photovoltaic Systems. *ETAİ 2021 Conference Proceedings*, (pp. 2445-4889)
- [29] Duranay, Z. B., & Guldemir, H. (2019 - June). Modelling and Simulation of a Single Phase Standalone PV System. *International Conference-11th Edition, Electronics, Computers and Artificial Intelligence*, Pitesti, ROMANIA
- [30] Özbay, H. (2020). Comparison of Sliding Mode and Fuzzy Logic MPPT Techniques for PV Systems. *Electronic Letters on Science & Engineering 16* (1), 26-35
- [31] Öztemel, E. (2003). *Yapay Sinir Ağları*. Papatya Yayıncılık,
- [32] Jain, A.K., Mao, J., & Mohiuddin, K. M. (1996) Artificial neural networks : a tutorial. *IEEE Comput.*, March 31-44.
- [33] Ensari, T., (2003). *Hücrel Yapay Sinir Ağları Uygulamaları*. (Master's dissertation, Istanbul Technical University).
- [34] Elmas, Ç. (2018). *Yapay Zeka Uygulamaları*. Seçkin Yayıncılık, Ankara
- [35] Kulaksız, A. A. (2007). *Maksimum Güç Noktası İzleyicili ve UVM İnverterli Fotovoltaik Sistemin Yapay Sinir Ağları Tabanlı Kontrolü*. (Doctoral dissertation, Selcuk University).
- [36] Kapukaya, O., & Güneş, M. (2019). Adaptif Parçacık Sürü Optimizasyon (APSO) ve Karınca Kolonisi Algoritması (KKA) Kullanarak Öz Ayarlamalı PID Kontrolör Tasarımı. *KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22 (4), 257-270

- [37] Aydoğan, D. (2019). *PSO Tabanlı Maksimum Güç Noktası Takip Algoritmasının Geliştirilmesi ve Uygulanması*. (Master's dissertation, Nevşehir Hacı Bektaş Veli University).
- [38] Çolak, M., (2020). *Fotovoltaik Güç Tahmini için Metasezgisel Optimizasyon Tabanlı Hibrit Model Tasarımı ve Analizi*. (Doctoral dissertation, Gazi University).
- [39] Uzlu, E. (2019). Estimates of Energy Consumption Using Neural Networks with the Grey Wolf Optimizer Algorithm for Turkey. *Gazi Üniversitesi, Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 7 (2), 245-262
- [40] Mirjalili, S., Mirjalili, S. M., & Lewis, A. (2014). Grey wolf optimizer. *Advances in Engineering Software*, 69, 46-61.
- [41] Hocaoğlu, F.O., & Kurban, M. (2018). Adaptif ağ tabanlı bulanık mantık çıkarım sistemi ile Eskişehir bölgesi için güneşlenme süreleri tahmini. *Journal of Engineering Sciences and Design*, 6 (3), 396-405
- [42] Hussaini, M., & Güngör, O. (2017). Uyarmalı Ağ Tabanlı Bulanık Çıkarım Sistemi ve Bulanık Mantık Tabanlı MPPT Tasarımı ve Kıyaslanması. *EMO Bilimsel Dergi*, 7 (14), 21-27
- [43] Bollipo, R. B., Mikkili, S., & Bonthagorla, P. K. (2021). Hybrid, Optimal, Intelligent and Classical PV MPPT Techniques: A Review. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 7 (1), 9-33
- [44] Mohanty, S., Subudhi, B., & Ray K. P. (2017). A Grey Wolf –Assisted Perturb&Observe MPPT Algorithm for a PV System. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 32 (1), 340-347
- [45] Shetty, D., Jayalakshmi, N. S., Arjun, M., & P. Hebbar, P. (2022). Evaluation of MPPT Algorithms for PV System under Partial Shading Conditions. *2022 International Conference on Intelligent Controller and Computing for Smart Power (ICICCCSP)*, (pp. 1-6)
- [46] Figueiredo, S. N., & Aquino, R. N. A. L. S. (2021). Hybrid MPPT Technique PSO-P&O Applied to Photovoltaic Sytems Under Uniform and Partial Shading Conditions. *IEEE Latin America Transactions* 19 (10), 1610-1617