

Fotovoltaj Güneş Pilleri : Maksimum Çıkış Gücünde İşletilmeleri

Doc. Dr. İsmail H. ALTAŞ
Karadeniz Teknik Üniversitesi
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
61080 Trabzon

FAX: (462) 325 7405
E-POSTA : altas@ktu.edu.tr
WWW : <http://www.altas.org>

ÖZET : Fotovoltaj güneş pillerinden oluşan bir panelin farklı ışık ve sıcaklık seviyeleri için elde edilen I-V ve P-V karakteristiklerinden maksimum güç noktalarının nasıl elde edildikleri, bu maksimum güç noktalarının bir maksimum güç denetleyicisi tarafından nasıl referans izleme noktası olarak kullanıldıkları bu yazıda açıklanmaktadır. Maksimum güç noktalarının belirlenip kullanılmasına ilişkin farklı yöntemler ele alınmakta, birbirlerine karşı üstünlükleri incelenmektedir. Bu amaçla maksimum güç noktalarının hazır veri tabloları olarak düzenlenmeleri ve polinom denklemleriyle temsil edilişleri açıklanmaktadır. Bunlara ek olarak yazar tarafından geliştirilen ve herhangi bir ön referans değer kullanmaksızın fotovoltaj pil panelinin çıkışından elde edilebilecek maksimum çıkış gücünü anında doğrudan doğruya belirleyen bir maksimum güç araştırma yöntemi de verilmektedir.

1. Giriş

Klasik enerji kaynaklarının sınırlı olmaları ve çevre üzerindeki olumsuz etkileri nedeniyle, yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi ve kullanım alanları gün geçtikçe artmaktadır. Bu yenilenebilir enerji kaynaklarından birisi olan güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştürebildikleri için güneş pilleri de oldukça önemli hale gelmiştir. Güneş pilleri yada diğer bir adıyla fotovoltaj (FV) pilleri algıladıkları ışığa bağlı olan I-V, dolayısıyla P-V karakteristikleri ile temsil edilirler. Bu pillerin seri/paralel bağlanmalarıyla meydana gelen fotovoltaj panellerinin I-V ve P-V karakteristikleri de ışığa ve çalışma sıcaklıklarına bağlı olarak değişir. Kuruluş maliyeti bakımından klasik güç üretim sistemlerine göre daha pahalı olduklarından FV panellerin tasarımı, çıkışından maksimum elektrik gücü alınacak şekilde yapılmalıdır. Çünkü hiç kimse o kadar masraf

ettikten sonra bir paneli olabileceğinden daha düşük verimle çalıştırmak istemez. Alabileceğini mümkün olduğunca almak ister. Bunun için de panelin değişen ışık seviyesi ve çalışma sıcaklıklarına karşılık düşen maksimum gücünün belirlenmesi, çalışma gücünün bu maksimum güç seviyesinde tutulması gerekir. Denetleyiciler kullanılarak panelin maksimum çıkış gücü izlenip, panel bu güçte çalıştırılabilir. Ancak izlenebilmeleri için, bu maksimum güç noktalarının değişik ışık seviyeleri ve sıcaklıklara karşılık düşen değerlerinin bilinmesi gerekir. Bu maksimum güç noktalarının belirlenmesi, ya daha önceden ya da o anda denetim sırasında yapılabilir.

Değişen çalışma sıcaklığı ve gün ışığı seviyesinin çıkış üzerindeki olumsuz etkilerini gidermek amacıyla genellikle iki farklı strateji uygulanır. Bunlar; 1) FV paneline gelen gün ışığını kontrol etmek, 2) FV panelin çıkış gücünü kontrol etmek. Bunlardan birincisinde, FV panelin algıladığı gün ışığını mümkün olduğu kadar yüksek tutabilmek için ya paneldeki güneş pillerinin bağlantı biçimleri değişen hava koşullarına göre yeniden düzenlenir [1,2], ya da güneşin değişen pozisyonunu izleyen güneş kollektörlri tasarlanıp denetlenir [2]. Güneşi izleme yöntemi genellikle merkezi odaklama ile ışığın toplandığı panellerde kullanılır ve bu yazı kapsamının dışında tutulmuştur. İkinci strateji olan FV panel çıkış gücünün izlenmesi ile ilgili çalışmalar ise genellikle izolasyon ve yüke doğrudan bağlanabilme problemleri ile ilgilidir. Rezistif veya DA motor türü yükleri besleyen ve tek-başına çalışan bir FV panelinin çıkışına aktardığı elektrik gücü, paneldeki FV pillerin farklı seri/paralel gruplar halinde bağlanmaları ile ayarlanabilir [3]. FV panele gelen giriş gücü (güneş gücü) nün değişen çalışma sıcaklığı ve gün ışığı seviyesine göre değişimi panel çıkışındaki gücü de etkiler. Ancak, panel çıkışına bağlı yük belirli, sabit bir güce ihtiyaç duyar. Dolayısıyla, eğer panelin çıkış gücü yük için gerekli gücü aşarsa, panel çıkışına ya ek yükler bağlamak ya da fazlalık gücü daha sonra gerektiğinde kullanmak üzere depolamak gerekir. Eğer panelin çıkış gücü yük için gerekli olan değer altındadır ise, bu durumda gerekli ek güç ya daha önceden depo edilen enerji ile karşılanır, ya da bazı yükler servis dışına alınır. Bütün bu durumlarda, FV panelin yüksek verimle çalışması için çıkış gücünün maksimum değerinde tutulması gerekir.

Bir FV panelin maksimum güç noktası (MGN) na, panelin çıkış gücü maksimize edilerek ulaşılır. Çıkış gücünün maksimize edilmesi ise, çalışma gücü ve referans maksimum güç (RMG) arasındaki hatanın denetleyiciler kullanılarak minimize edilmesi ile gerçekleştirilir. Dolayısıyla, çalışma gücü ile karşılaştırılmadan önce, bu RMG'ün değişen çalışma sıcaklığı ve gün ışığı seviyelerine bağlı olarak belirlenmesi gerekir. Bu yazıda RMG ün belirlenmesinde kullanılan bazı yöntemler verilmekte ve geliştirilen yeni bir yöntem [4] tanıtılmaktadır.

2. FV Panelin Maksimum Güç Noktasında Çalıştırılması

Bir FV panelin maksimum güç noktasında (MGN) çalışması, o panelin çıkışından yüke aktarılan gücün maksimize edilmesiyle sağlanır. Değişen çalışma sıcaklığı ve güneş radyasyon seviyesine bağlı olarak FV panelin çıkışından alınabilecek maksimum elektrik gücü de değişir. Farklı çalışma sıcaklığı ve güneş radyasyonu seviyelerindeki çıkış güçlerinin maksimum değerleri, *referans maksimum güç* (RMG) olarak tanımlanabilirler. Bu referans maksimum güç ile çalışma gücü arasındaki fark, *maksimum güç hatası* (MGH) olarak isimlendirilir ve denetleyiciler kullanılarak minimize edilir. Çalışma sıcaklığı ve güneş radyasyonu seviyeleri değiştiğinde, referans maksimum

güç de değişir. Dolayısıyla, bu değişken referans maksimum gücün her an çalışma gücüyle kıyaslanabilmesi için önceden belirlenmesi gerekir.

3. Referans Maksimum Güç Noktası (RMGN) nın Belirlenmesi

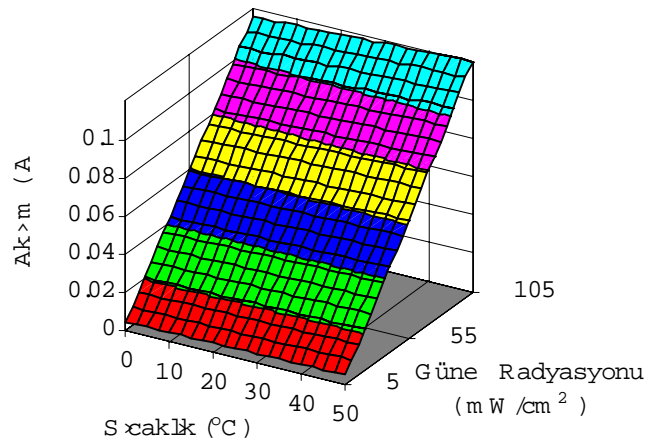
FV pil panellerinin maksimum güç noktalarının belirlenebilmeleri için bugüne kadar değişik yöntemler verilmiştir [5-10]. Bu yöntemler aşağıdaki gibi sınıflandırılabilirler:

1. Daha önceden farklı sıcaklık ve güneş radyasyonu seviyeleri için belirlenmiş olan maksimum güç noktalarının depolandığı *el-altı* tablolarının kullanılması.
2. Sıcaklık ve güneş radyasyonu seviyelerinde herhangi bir değişiklik meydana geldiğinde, I-V karakteristiğinde maksimum gücü veren akım ve gerilim değerlerinin, yani P-V karakteristiğinin maksimum noktasının belirlenmesinde, FV pil modelinin kullanılması.
3. Sıcaklık ve güneş radyasyonu seviyelerinde meydana gelen değişikliklere bakmaksızın maksimum güç noktasını sürekli olarak araştıran araştırma algoritmalarının kullanılması [4,9,10].

İlk iki yöntemin uygulanabilmesi için bir FV pil modelinin yanısıra sıcaklık ve güneş radyasyonu seviyelerinin de ölçülmesi gerekir. Üçüncü yöntemin [4] uygulanmasında ise, bunların hiç birine ihtiyaç yoktur. Aşağıda, her üç yöntem de incelenerek birbirlerine göre üstünlükleri gözden geçirilmektedir.

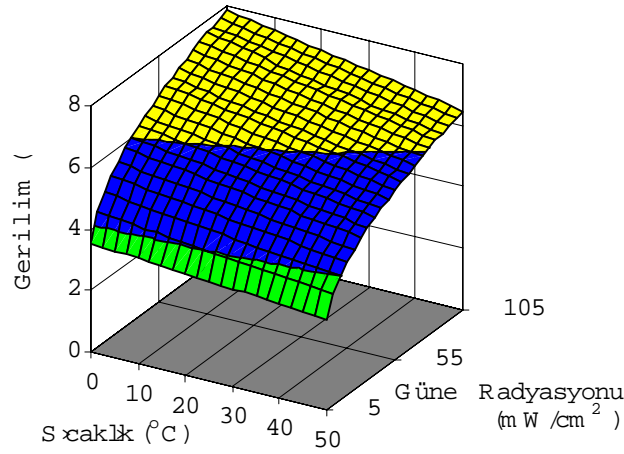
3.1. El-altı Tabloları ya da Polinom Denklemlerinin Kullanılması:

FV pil modeli kullanılarak, I-V ve P-V karakteristikler farklı çalışma sıcaklıkları ve güneş radyasyonu seviyeleri için elde edilirken, bu karakteristiklerin maksimum güç noktaları da belirlenerek farklı çalışma sıcaklıkları ve güneş radyasyonu seviyeleri için *el-altı* tablolarında saklanırlar. Değişik çalışma sıcaklıkları ve güneş radyasyonu seviyelerine göre maksimum çıkış gücüne karşılık gelen FV panel akım ve gerilimlerinin değişimleri, el-altı tabloları yerine sırasıyla Şekil 1 ve 2 deki, FV çıkış gücünün değişimi ise Şekil 3 deki gibi üç-boyutlu olarak gösterilebilirler.

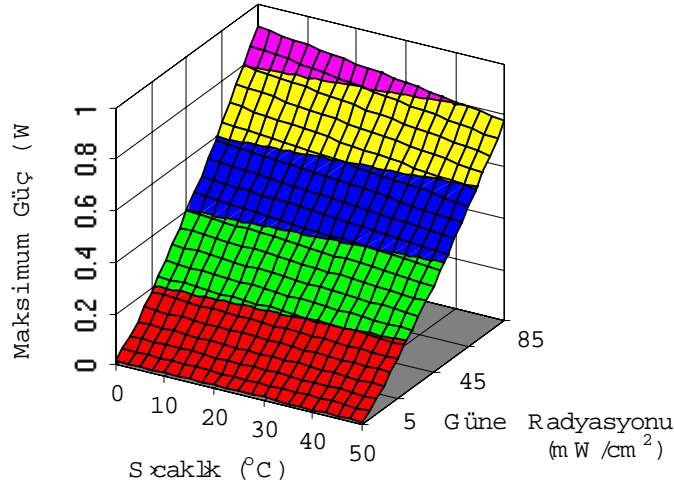


Şekil 1. Değişen ortam sıcaklığı ve güneş radyasyonu seviyeleri için

FV pilin maksimum gücünü veren akım eğrileri.



Şekil 2. Değişen ortam sıcaklığı ve güneş radyasyonu seviyeleri için FV pilin maksimum gücünü veren gerilim eğrileri.



Şekil 3. Değişen ortam sıcaklığı ve güneş radyasyonu seviyeleri için FV pilin maksimum güç eğrileri.

Bu üç boyutlu yüzeyler, eğri uydurma yöntemleri uygulanarak polinom denklemleri ile temsil edildiklerinde, aralıklı olarak kaydedilmiş el-altı veri tabloları yerine, sürekli değere sahip veri denklemleri oluşturulmasını sağlarlar. FV pilin maksimum güç noktasındaki gücü P_M , akımı I_M , ve gerilimi V_M sırasıyla Denklem (1), (2) ve (3) de verilen üçüncü dereceden polinom denklemleri ile temsil edilebilirler.

Maksimum güç noktaları için:

$$\begin{aligned} P_M = & K_{P0} + K_{P1}S_X + K_{P2}S_X^2 + K_{P3}S_X^3 + \\ & K_{P4}T_X + K_{P5}T_XS_X + K_{P6}T_XS_X^2 + K_{P7}T_XS_X^3 + \\ & K_{P8}T_X^2 + K_{P9}T_X^2S_X + K_{P10}T_X^2S_X^2 + K_{P11}T_X^2S_X^3 + \\ & K_{P12}T_X^3 + K_{P13}T_X^3S_X + K_{P14}T_X^3S_X^2 + K_{P15}T_X^3S_X^3 \end{aligned} \quad (1)$$

Maksimum Gücü Veren Akım Değerleri İçin:

$$\begin{aligned} I_M = & K_{I0} + K_{I1}S_X + K_{I2}S_X^2 + K_{I3}S_X^3 + \\ & K_{I4}T_X + K_{I5}T_XS_X + K_{I6}T_XS_X^2 + K_{I7}T_XS_X^3 + \\ & K_{I8}T_X^2 + K_{I9}T_X^2S_X + K_{I10}T_X^2S_X^2 + K_{I11}T_X^2S_X^3 + \\ & K_{I12}T_X^3 + K_{I13}T_X^3S_X + K_{I14}T_X^3S_X^2 + K_{I15}T_X^3S_X^3 \end{aligned} \quad (2)$$

Maksimum Gücü Veren Gerilim Değerleri İçin:

FV pilin maksimum güç noktasına karşılık gelen gerilim değeri ilk iki adımda belirlenen maksimum güç ve maksimum gücü veren akımın kullanılmasıyla

$$V_M = \frac{P_M}{I_M} \quad (3)$$

ifadesinden bulunur.

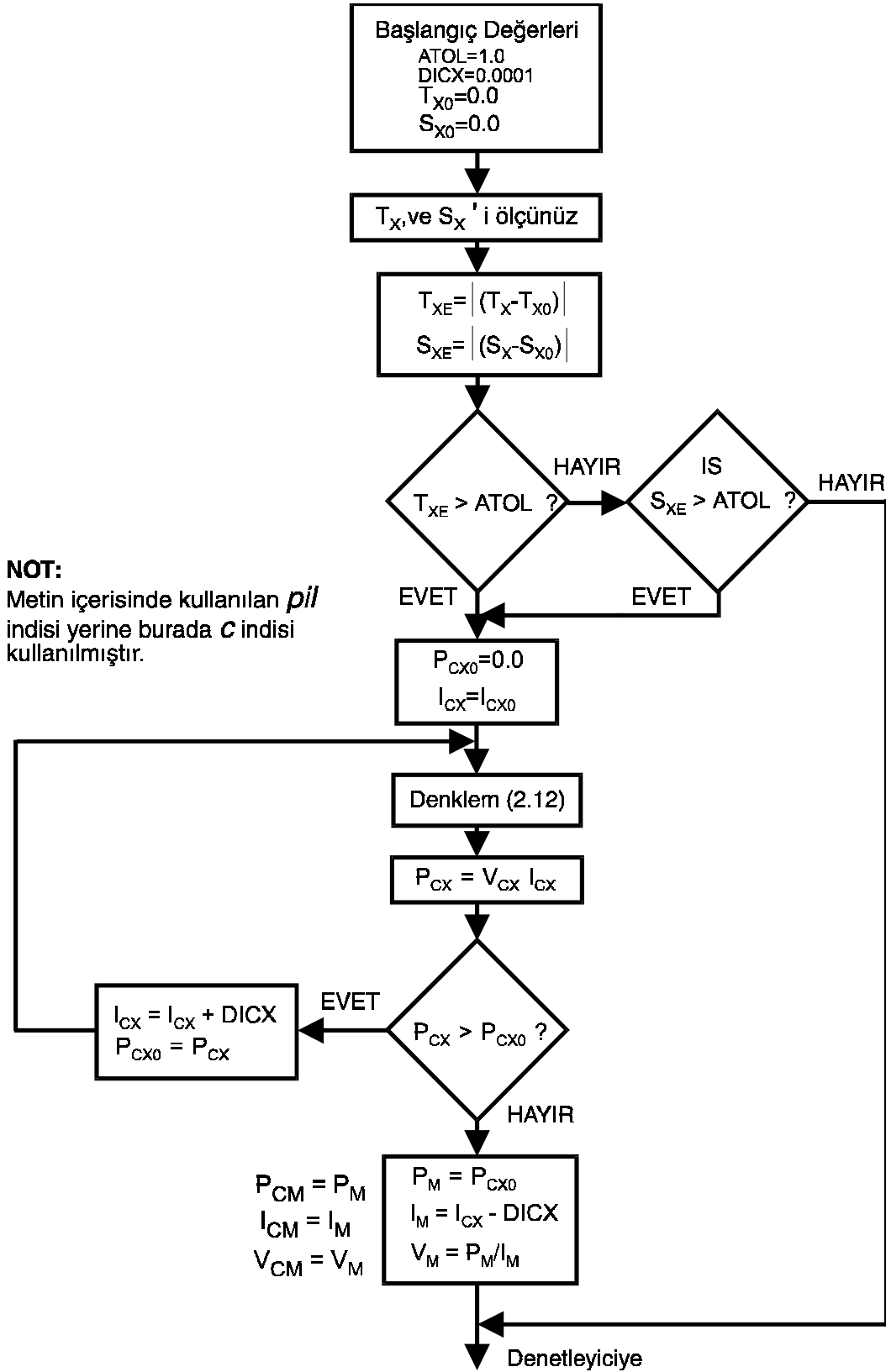
Polinom denklemlerinin katsayıları, bilinen ve sırasıyla Şekil 1, 2, ve 3 de verilen I_M , V_M , ve P_M yüzeylerine uygulanan en küçük kareler yöntemine dayalı bir eğri uydurma işlemi ile belirlenebilir. Polinom denklemlerinin kullanılması ile maksimum güç noktasına ilişkin güç, akım ve gerilim değerleri, sıcaklık ve güneş radyasyonu seviyesine bağlı olarak $I_M=f(S_X, T_X)$, $P_M=f(S_X, T_X)$, $V_M=f(S_X, T_X)$ biçiminde ifade edilebilirler. Polinom denklemlerinin kullanılmasıyla elde edilen P_M , I_M ve V_M değerleri aynı sıcaklık ve güneş radyasyonu seviyelerine ait çalışma gücü $P_{Xpil}=f(S_X, T_X)$, çalışma akımı $I_{Xpil}=f(S_X, T_X)$, ve çalışma gerilimi $V_{Xpil}=f(S_X, T_X)$ ile karşılaştırılarak maksimum çalışma gücü hatası belirlenir.

3.2. Araştırma Algoritmalarının Kullanılması

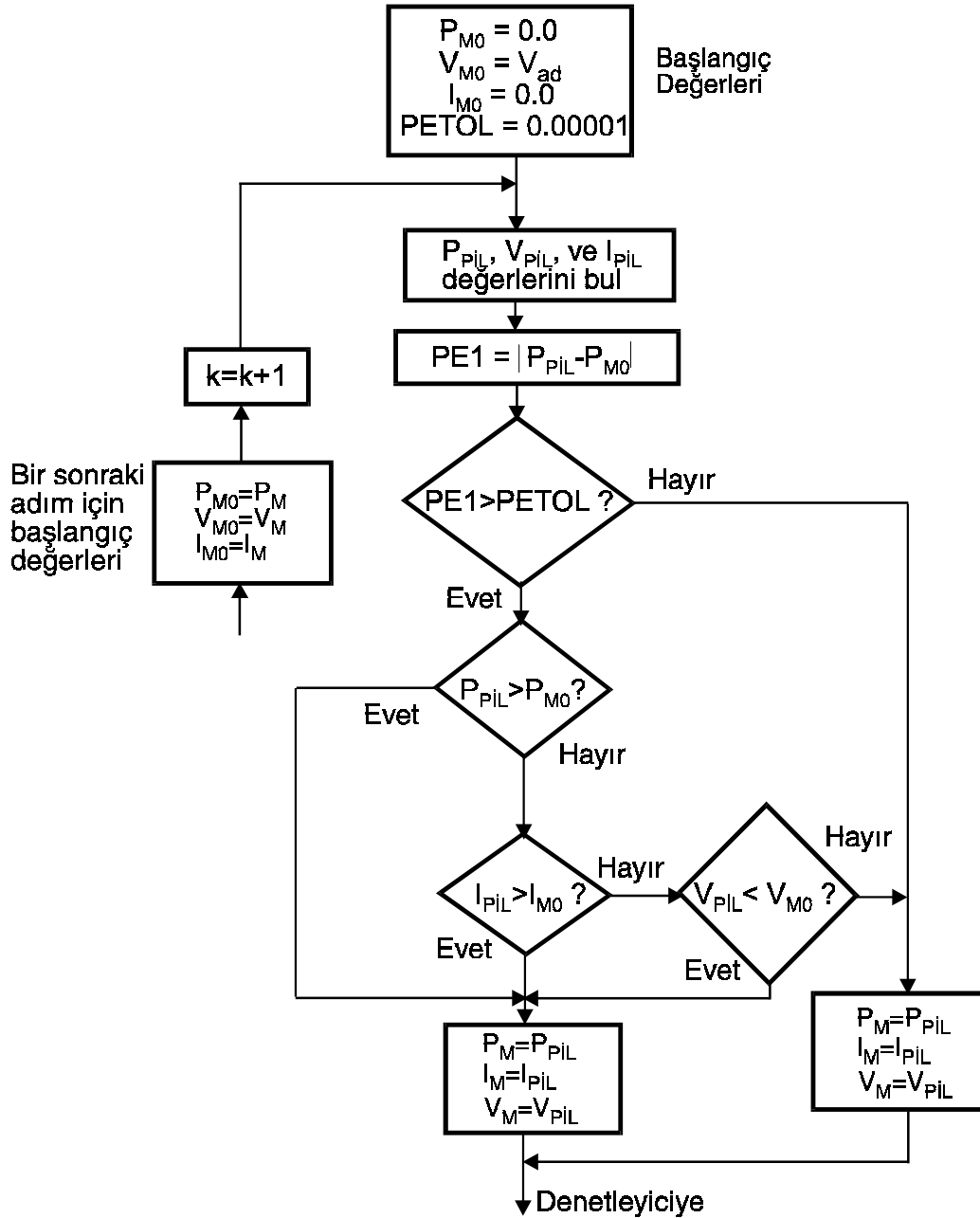
Daha önce de belirtildiği gibi, referans maksimum gücün belirlenmesinde polinom denklemler yerine araştırma algoritmaları da kullanılabilir. İki farklı araştırma algoritmasına ilişkin akış diyagramları Şekil 4 ve 5 de verilmektedir. Şekil 4 de sıcaklık ve güneş radyasyonu seviyelerinin arka arkaya ölçülen iki değeri arasındaki fark karşılaştırılmaktadır. Eğer sıcaklık ve güneş radyasyonu seviyelerinde kabul edilebilir bir değerden (ATOL) daha fazla bir değişme olursa, FV pilin I-V karakteristiğini temsil eden karakteristik model denklemi simule edilerek yeni sıcaklık ve güneş radyasyonu seviyeleri için yeni bir referans maksimum güç noktası (RMGN) hesaplanır. Küçük bir başlangıç değerinden başlanarak, maksimum güç elde edilinceye kadar FV pilin akımı

adım adım artırılır. Her adımda, FV pilin gücü hesaplanır ve bir önceki değeri ile karşılaştırılır. Hesaplanan son güç değeri bir önceki değerden daha küçük olunca bu karşılaştırma işlemi sona erdirilir. Dolayısıyla, bir önceki adımda hesaplanan güç değeri o andaki sıcaklık ve güneş radyasyonu seviyelerine ilişkin yeni referans maksimum güç P_M olmaktadır. I-V karakteristiğinde bu P_M gücüne karşılık gelen I_M akımı ve V_M gerilimi ise yeni referans gücü veren akım ve gerilimdir. Yeni RMGN büyüklükleri P_M , I_M , ve V_M elde edilince, sıcaklık ve güneş radyasyonu seviyelerine ilişkin T_X ve S_X bir sonraki döngüde yeni başlangıç değeri olarak kullanılmak üzere, T_{X0} ve S_{X0} değerlerine atanır. Anlaşılacağı gibi, değişimin belirlenebilmesi için sıcaklık ve güneş radyasyonu seviyelerinin sürekli olarak ölçülmeleri gerekir. Ayrıca bu algoritma, RMGN'nin belirlenmesi sırasında, RMGN belirleninceye kadar döngüyü sadece kendi içerisinde sürdürdüğü için, bilgisayarla denetlenen sistemlerde bilgisayarın girişi ile çıkışı arasına istenmeyen bir gecikme ekler. Bu gecikme bilgisayar denetimli sistemlerin kararlılığını olumsuz yönde etkilediğinden, istenmeyen bir durumdur. Eğer sıcaklık ve güneş radyasyonu seviyelerinde sık sık değişiklikler olursa maksimum güç noktası (MGN) araştırma algoritmasının neden olduğu gecikme iyice artarak Analog-Digital (A-D) ve Digital-Analog (D-A) dönüştürme işlemini etkiler ve sistem kararsızlığa itilir. Ancak, sıcaklık ve güneş radyasyonu seviyelerinde meydana gelen değişimler sistemdeki elektriksel değişimler ve bilgisayardaki hesaplama zamanına göre çok daha yavaş olduğu için bu *araştırma algoritması* rahatlıkla uygulanabilir. Bu algoritma ayrıca FV pil akımındaki artım miktarı DICX'e bağlı olarak bir MGN hatası meydana getirir.

Şekil 5 de yeni bir MGN araştırma algoritmasının akış diyagramı görülmektedir. Bu yeni algoritmada sıcaklık ve güneş radyasyonu seviyelerinin ölçülmelerine ihtiyaç yoktur. Bu yeni algoritma, FV pil panelin I-V karakteristiğinde MGN'nı PETOL olarak tanımlanan bir hatayla arar. Başlangıçta MGN'na ilişkin referans P_M gücü ve I_M akımı sıfıra eşitlenirken V_M gerilimi de FV pilin açık devre gerilimi V_{ad} ye eşitlenir. Her örnekleme anında, P_M nin referans başlangıç değeri olan P_{MR} ile o andaki çalışma gücü P_{PIL} arasındaki fark, PE1, hesaplanır ve kabul edilebilir bir MGN hatası olan PETOL ile kıyaslanır. Eğer aradaki PE1 farkı PETOL dan büyükse algoritma yeni bir MGN araştırır. Eğer aradaki PE1 farkı PETOL dan küçükse o anda P_M , I_M ve V_M için başlangıçta atanmış olan P_{M0} , I_{M0} ve V_{M0} değerleri değiştirilmeden tutulur. Eğer çalışma gücü P_{PIL} o andaki MGN değeri olan P_{M0} dan büyükse, P_{PIL} değeri yeni P_{M0} olarak atanır. Eğer çalışma gücü P_{PIL} o andaki MGN değeri olan P_{M0} dan küçükse, çalışma akımı I_{PIL} ve gerilimi V_{PIL} sırasıyla MGN akımı I_{M0} ve gerilimi V_{M0} ile kıyaslanır. Eğer I_{PIL} değeri I_{M0} dan daha büyükse, ya da V_{PIL} değeri V_{M0} dan küçükse, çalışma gücü noktası (ÇGN) değerleri P_{PIL} , I_{PIL} ve V_{PIL} yeni referans MGN değerleri olarak atanırlar. Aksi halde algoritma o andaki MGN değerleri olan P_{M0} , I_{M0} , ve V_{M0} ile işlemlerine devam eder. Bu araştırma algoritmasının olumsuz tek yanı, yük gücüne bağlı olmasıdır. FV pil panelin çıkış gerilimi algoritma tarafından ayarlanarak yükün çalışma akımı, FV pil panelin I_M MGN akımına denk hale getirilir. Eğer yükün gücü FV pil panelin MGN değerinden çok küçükse, bu algoritma MGN'nı belirleyemez. Bu durumda, ek yükler bağlanarak FV panelin akımı, dolayısıyla çalışma gücü MGN'na yükseltilebilir. Eğer referans MGN sıcaklık ve güneş radyasyonu seviyelerine bağlı olarak değişirse, algoritma bu değişikliği görerek panelin çıkış gerilimini ayarlar ve yeni MGN'nı araştırıp bulur.



Şekil 4. Sıcaklık ve güneş radyasyonu seviyelerinin sürekli olarak ölçülmelerini gerektiren FV pil MGN araştırma algoritması.

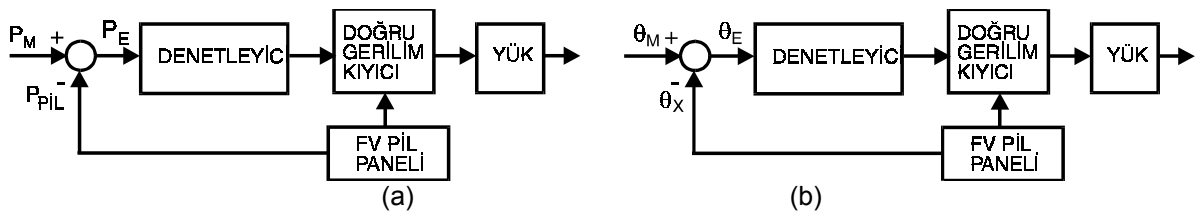


Şekil 5. Sıcaklık ve güneş radyasyonu seviyelerinin ölçülmesini gerektirmeyen FV pil MGN araştırma algoritması.

4. FV Pil Panelinin Maksimum Güç Noktasında Çalıştırılması

FV güneş pili paneli, daha önce de belirtildiği gibi, üretebildiği maksimum gücü çıkışından alınacak şekilde tasarlanarak, maliyeti azaltılıp, çalışma verimi yüksek tutulur. Bir FV pili maksimum güç noktasında çalıştırabilmek için, bu maksimum gücün belirlenerek referans alınması gerekir. Bir önceki kısımda, FV güneş pili ya da paneli MGN na ilişkin değerler olan FV güneş pilinin maksimum gücü P_M , maksimum gücüne karşılık gelen akımı I_M ve gerilimi V_M nin değişen sıcaklık ve ışık seviyeleri için nasıl belirlenebileceği ayrıntılı biçimde verildi. Değişen sıcaklık ve ışık seviyeleri için her an belirlenen bu MGN değerleri, FV pilin o andaki çalışma gücü P_{PiL} , çalışma akımı I_{PiL} ve çalışma gerilimi V_{PiL} ile karşılaştırılarak denetleyiciler tarafından kompanse edilecek

olan MGN hata işaretleri elde edilir. Böyle bir denetim sisteminin prensip blok diyagramı Şekil 6 (a) ve (b) de verilmektedir. Şekil 6 (a) da, o andaki P_M maksimum gücü yine o andaki P_{PIL} çalışma gücü ile karşılaştırmakta ve aradaki fark bir doğru gerilim kıyıcısının iletim periyodlarının belirlenmesi amacıyla denetleyici tarafından kullanılmaktadır. Eğer P_M ile P_{PIL} birbirlerine eşit değilse, denetim sistemi kıyıcının iletim periyodunu azaltıp ya da artırarak aradaki farkı minimuma indirir. Fark minimum ya da sıfır ise, kıyıcının iletim periyodunda bir ayarlama yapılmaz. Böyle bir sistemde, kıyıcının iletim periyodunu ayarlamak suretiyle yüke uygulanan gerilimin genliği, dolayısıyla yükün FV pil panelinden çektiği akım ayarlanmış olur. Yük akımı ile FV pil panelin akımı aynı olduğundan, uygulanan gerilimin ayarlanmasıyla yük akımı, FV pil panelin maksimum gücüne karşılık gelen akım değerinde kalmaya zorlanır. FV pil panelinin P_{PIL} çalışma gücü, panelin çalışma akımı ile bu akıma karşılık gelen çıkış geriliminin çarpılması sonucu belirlenip, maksimum güç P_M ile kıyaslanır. Güç yerine I_M akımı ve V_M gerilimi de referans alınarak denetleyici de kullanılabilirler. Bu durumda bir akım bir de gerilim geri besleme çevrimi kullanmak gerekirdi.



Şekil 6. FV güneş pili paneli MGN denetimi blok diyagramı.

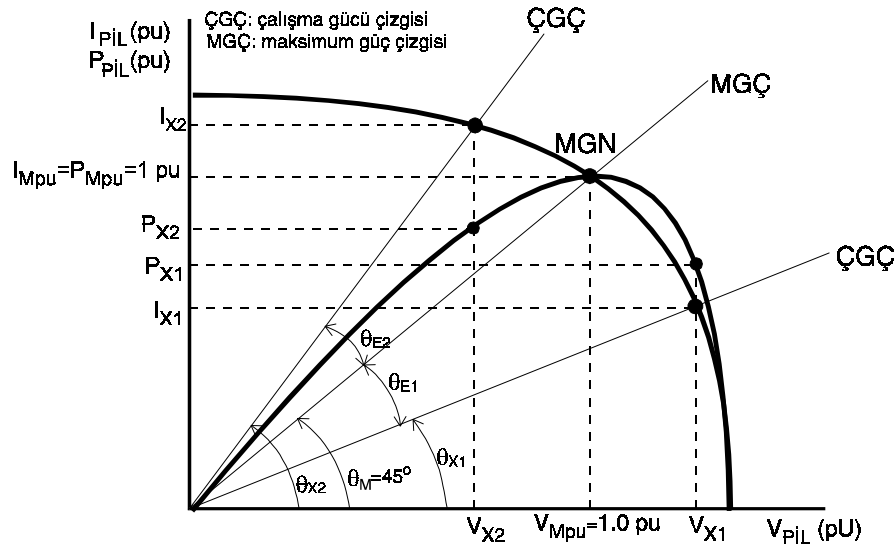
FV güneş pilinin MGN'nı izlemek için kullanılan denetim sistemlerinde genellikle MGN değerlerine karşılık gelen güç, akım ve gerilim referans giriş olarak alınırlar. Ancak bu değerler sürekli olarak sıcaklık ve ışık seviyelerine bağlı olarak değiştikleri için, sistemi doğrusallıktan uzaklaştırıp denetim işlemini güçleştirir. Bu durum, bulanık mantık tabanlı denetim için bir problem teşkil etmezken, özellikle klasik denetim sistemlerinde kararsızlığa yol açar. Referans olarak alınan MGN değerlerindeki değişimlerin denetim işlemi üzerindeki etkilerini azaltmak için uygulanan bir yöntem [4] burada tanıtılacaktır. Bu yöntemde, MGN değerleri doğrudan referans değerler olarak kullanılmak yerine, bir birim-değer (per-unit) sisteminin taban değerleri olarak alınırlar. Ögüle ki, $P_{TABAN}=P_M$, $V_{TABAN}=V_M$ ve $I_{TABAN}=I_M$ olmak üzere;

$$\begin{aligned} P_{Mpu} &= 1.0 \text{ pu} \\ V_{Mpu} &= 1.0 \text{ pu} \\ I_{Mpu} &= 1.0 \text{ pu} \end{aligned} \quad (4)$$

değerleri sürekli olarak aynı kalır. MGN değerlerinin birim-değer ile ifade edilmeleri halinde FV güneş pilinin I-V ve P-V karakteristikleri Şekil 7 deki gibi olurlar.

FV pil panelinin MGN'nda çalıştırılması, Şekil 7 de θ_E ile temsil edilen ve çalışma gücü çizgisi (ÇGÇ) ile maksimum güç çizgisi (MGÇ) arasındaki fark olarak tanımlanan maksimum güçte çalışma hatası (MGÇH) nın minimize edilmesiyle gerçekleştirilir. Güç yerine güç açıları ile temsil edilen MGNH, θ_E nin minimize edildiği denetim sistemi blok diyagramı Şekil 6 (b) de verilmektedir. Şekil 7 den görüleceği gibi, ÇGÇ, FV pilin I-V karakteristiğindeki çalışma gücü noktası (ÇGN) ile orjini birleştiren çizgidir. Benzer şekilde MGÇ de MGN'nı orjinle birleştiren çizgidir. I-V karakteristiğinin gerilim eksen referans eksen olarak kabul edilip, maksimum güç açısı ($MGA=\theta_M$), gerilim

ekseninden MGÇ ne ölçülen açı, çalışma gücü açısı ($\text{ÇGA}=\theta_{CX}$), ise gerilim ekseninden ÇGÇ ne ölçülen açı olarak tanımlanır.



Şekil 7. Bir FV pil panelinin birim değerlerdeki maksimum güç ve çalışma gücü noktalarına ilişkin büyüklükleri de içeren I-V ve P-V karakteristikleri.

Eğer MGN'ndaki gerilim ve akım sırasıyla V_{Mpu} ve I_{Mpu} olarak, ÇGN'ndaki gerilim ve akım da sırasıyla $V_{PIL,pu}=V_{Xpu}$ ve $I_{PIL,pu}=I_{Xpu}$ olarak gösterilirse, MGA ve ÇGA sırasıyla aşağıdaki gibi elde edilirler.

$$\theta_M = \tan^{-1}\left(\frac{I_{Mpu}}{V_{Mpu}}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{1}{1}\right) = 45^\circ \quad (5)$$

$$\theta_X = \tan^{-1}\left(\frac{I_{Xpu}}{V_{Xpu}}\right) \quad (6)$$

Böylece maksimum güçte çalışma hatası (MGÇH),

$$\theta_E = \theta_M - \theta_X \quad (7)$$

şeklinde belirlenir. Sürekli olarak, I_{Mpu} ve V_{Mpu} birim değerde kalacaklarından, Denklem (5) ile verilen oran sabit kalır. Yani, $\theta_M=45^\circ$ olarak sabit kalır. $I_{PIL}=0$ A ($I_{Xpu}=0$ pu) ve $V_{PIL}=0$ V ($V_{Xpu}=0$ pu) iken, ÇGA, $\theta_X=0^\circ$ olduğundan, maksimum güçte çalışma hatası (MGÇH), $\theta_M=45^\circ$ değerindeki MGA için -45° ile $+45^\circ$ arasında değişir. Eğer yük akımının yani FV panel akımının değeri MGN'ndaki akım değeri ile aynı değilse, panel MGN dışında başka bir noktada çalışır. $I_X=I_{X2}>I_M$ değerindeki bir çalışma akımı için, panel aşırı akım bölgesinde çalışır. Bu durumda panelin çıkış gerilimi V_{X2} düşük olurken çalışma gücü açısı ÇGA, maksimum güç açısı MGA'dan büyük olur ($\theta_{X2}>\theta_M$). $I_X=I_{X1}<I_M$ değerindeki bir çalışma akımı için, ÇGA<MGA ($\theta_{X1}<\theta_M$) olur. Bu durumda ise panel aşırı gerilim bölgesinde çalışır. Bu da panel akımının MGN'inde çalışmayı sağlayacak değere göre çok küçük olduğu anlamına gelir. MGÇH, θ_E , aşırı akım bölgesinde 0° ile 45° arasında değişirken, aşırı gerilim bölgesinde -45° ile 0° arasında değişir. Bu θ_E hatası daha sonra denetleyiciler kullanılarak çalışma gücü noktası (ÇGN) nı maksimum güç noktası (MGN) na getirecek şekilde minimize edilir.

5. Sonuç ve Değerlendirme

FV güneş pili panelleri kurulması pahalı olan sistemlerdir. Dolayısıyla bu sistemlerin maksimum verimle işletilmeleri gerekli ve zorunludur. Dolayısıyla değişen ortam sıcaklıkları ve güneş radyasyonu seviyeleri için panelin verebileceği maksimum çıkış gücünü belirlemek gerekir. Bu amaçla farklı maksimum güç belirleme yöntemleri uygulanmaktadır. Bu yöntemlerden biri FV pil karakteristiklerini temsil eden model denklemlerine dayanan ve ya el-altı tablolarında ya da polinom biçimli denklemlerle ifade edilen maksimum güç noktalarıdır. Diğer yöntemlere göre basit gibi görünse de bir model gerektirdiği için farklı sistemlerde yeni modelleme gerektirir. Dolayısıyla kullanımı her sistem için özeldir. Diğer yöntemler ise araştırma yöntemleri olup, maksimum güç noktasını araştıran algoritmalar içerirler. Daha az malzeme gerektirdiği için bu araştırma yöntemlerinden ikincisi daha kullanışlı ve ekonomik gözükmektedir.

Kaynaklar

- [1]. M.A. Green, "Solar Cells - Operating Principles, Technology, and System Applications", Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J. 07632, 1982.
- [2]. H.S. Rauschenbach, "Solar Cell Array Design Handbook-The Principles and Technology of Photovoltaic Energy Conversion", Van Nostrand Reinhold Company, 1980.
- [3]. M. Buresch, "Photovoltaic Energy Systems Design and Installation", McGraw-Hill, Inc., 1983.
- [4]. İ.H. Altasş and A.M. Sharaf, "A Novel On-Line MPP Search Algorithm For PV Arrays", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 11, No. 4, December 1996, pp. 748-754.
- [5]. J.Appelbaum and M.S.Sarma, "The Operation of Permanent Magnet DC Motors Powered by a Common Source of Solar Cells", IEEE Trans. Vol. EC-4,. No. 4, December 1989, pp.635-642.
- [6]. B.K. Bose et al, "Microcomputer Control of a Residential Photovoltaic Power Conditioning System", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. IA-21, No. 5, September/October 1985, pp.1182-1191.
- [7]. A. Imece et al, "An Approach for Modelling Self-Commutated Static Power Converters for Photovoltaic Islanding Studies", IEEE Trans. Vol. EC-4,. No. 3, September 1989, pp.397-401.
- [8]. J.Appelbaum, "The Operation of Loads Powered by Separate Sources or by a Common Source of Solar cells", IEEE trans. Vol. EC-4, No.3, September 1989, pp.351-357.
- [9]. F. Harashima et al, "Microprocessor-Controlled SIT Inverter for Solar Energy System", IEEE Trans. Industrial Electronics, Vol. IE-34, No. 1, February 1987, pp. 50-55.
- [10]. O. Wasynczuk, "Dynamic Behavior of a Class of Photovoltaic Power Systems", IEEE Trans., Vol.PAS-102, No. 9, September 1983, pp.3031-3037.