

Fotovoltaj Güneş Pilleri : Eşdeğer Devre Modelleri ve Güneş ışığı ile Sıcaklığın Etkileri

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

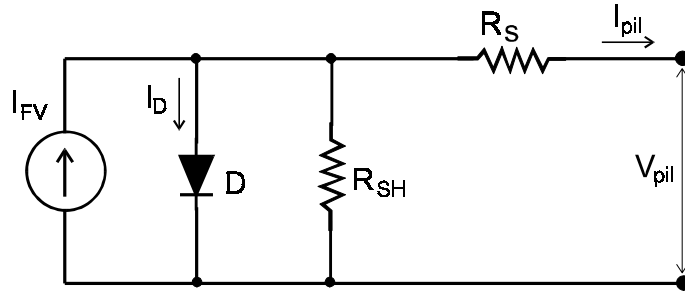
Fotovoltaj (FV) güneş pillerinin elektriksel eşdeğer devre ve ilgili matematiksel modellerinin belirlenip incelenmesi bu makalenin ana konusunu oluşturmaktadır. Bu modellerde kullanılan parametreler, değişen güneş ışığı şiddeti ve ortam sıcaklıklarına bağlı olarak değiştiklerinden, modellemede bu durum da dikkate alınmıştır. Dolayısı ile güneş ışığı şiddeti ve ortam sıcaklığındaki değişimlerin geliştirilen FV güneş pili ve paneli modellerini nasıl etkiledikleri ayrıntılı olarak verilmiştir. Bu amaçla FV güneş pili panelinin belirli bir güneş ışığı ve ortam sıcaklığı seviyesinde deneysel olarak elde edilen ve referans alınan akım-gerilim karakteristiğinden model parametrelerinin belirlenmesi ve farklı güneş ışığı ve ortam sıcaklığı seviyeleri için bu modelin yeniden düzenlenmesi ayrıntılı olarak anlatılmaktadır.

1. Giriş

Diğer elektrik enerji kaynaklarının tasarımında ve kullanımında olduğu gibi, FV güneş pili panelleri tasarlanırken de, ihtiyaç duyulan güç ve gerilimi sağlayacak şekilde panelin elektriksel özellikleri önceden yapılan simülasyon çalışmalarıyla incelenir. Bu inceleme sonucunda seri-paralel bağlanacak olan pil sayıları, panelin değişik ışık şiddeti ve çalışma sıcaklığı seviyelerinde verebileceği maksimum çıkış gücü, ve yükteki değişimler karşısında panel çıkış büyüklüklerinin göstereceği tepkeler belirlenerek, gerekli önlemler tasarım aşamasında alınır. Ayrıca tasarımı tamamlanmış olan FV pil ve panellerinin daha verimli ve etkin bir şekilde kullanımını sağlamak, gerekli denetim işlemlerini gerçekleştirmek için, de kurulu sistemin simülasyonuna ihtiyaç duyulur.

FV güneş pilini simüle etmek için bir eşdeğer devre modeline ihtiyaç vardır. Günümüze kadar FV güneş pillerinin devre modellerine ilişkin değişik çalışmalar yapılmıştır [1,2]. FV güneş pillerinin geçici ve sürekli durum analizine ilişkin devre modellerine ait bir çalışma [2] nolu referansta verilmektedir. Burada, yazarlar Şekil 1 deki eşdeğer devre modelinden hareketle geliştirilen yedi farklı FV pil modelini incelemiştir. Burada bu modellerin hepsine değinilmeyecek, ancak varılan sonuçlar değerlendirilerek daha basit ve kullanışlı bir model belirlenecektir.

2. FV Güneş Piliin Eşdeğer Devre Modelleri



Şekil 1 FV güneş pilinin genel statik eşdeğer devresi.

Şekil 1 de verilen devre modeli, FV güneş pilinin genel statik eşdeğer devresidir. Bu modeldeki parametreler ışık şiddeti ve sıcaklığa bağlıdır. Dolayısıyla hesaplanacak her çıkış değeri için ışık ve sıcaklık seviyelerinin bilinmesi gerekir. Bu şekilde verilen devre modeli, matematiksel olarak Denklem (1) ile temsil edilebilir.

$$I_{pil} = I_{FV} - I_0 \left[\exp \left(\frac{e}{kT_{pil}} (V_{pil} + R_S \times I_{pil}) \right) - 1 \right] - \frac{V_{pil} + R_S \times I_{pil}}{R_{SH}} \quad (1)$$

Burada

- I_{pil} : FV pilin çıkış akımı (A)
- I_{FV} : Işık seviyesi ve P-N birleşim noktası sıcaklığının fonksiyonu, Fotoakım (A)
- I_0 : D diyodunun ters doyma akımı (A)
- V_{pil} : FV pilin çıkış gerilimi (V)
- R_S : Eşdeğer devrenin seri direnci (Ohm)
- R_{SH} : Eşdeğer devrenin paralel direnci (Ohm)
- e : Elektron yükü ($1.6021917 \times 10^{-19}$ C)
- k : Boltzmann sabiti (1.380622×10^{-23} J/°K)
- T_{pil} : Referans çalışma sıcaklığı (°K).

Boltzman sabiti k ve referans çalışma sıcaklığı T_{pil} aynı sıcaklık birimine sahip olmalıdırlar. Yani her ikisi de ya Derece yada Kelvin olarak hesaba katılmalıdır. Boltzman sabiti k genelde Kelvin olarak verildiği için, T_{pil} sıcaklığını Kelvine dönüştürerek kullanmak daha uygun olur.

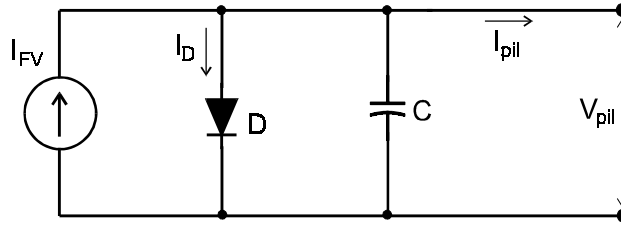
FV pilin I-V karakteristiği Denklem (1) yerine polinom denklemleri ile de temsil edilebilir. Polinom denklemlerinde pil akımı ya da gerilimi biri diğerinin fonksiyonu olacak şekilde temsil edilirler. Örneğin, Denklem (2) da pil akımı, pil gerilimine bağlı olarak verilmiştir.

$$I_{pil} = k_0 + k_1 \times V_{pil} + k_2 \times V_{pil}^2 + k_3 \times V_{pil}^3 + \dots + k_n \times V_{pil}^n \quad (2)$$

Bu polinom denklemindeki katsayılar, deneysel olarak belirlenmiş bir FV pilin I-V karakteristiğinden, kullanılan polinom derecesi kadar, mesela Denklem (2) için n adet, veri alınıp, bu n adet denklemin çözülmesiyle, veya *En Küçük Kareler yöntemi* kullanılıp eğri uydurmak suretiyle belirlenebilirler. Yedinci dereceden bir polinom, FV pilin I-V karakteristiğini temsil etmeye yeterli olacaktır. Ancak bu tür denklemlerin derecesi

arttıkça katsayıların belirlenmesi zorlaşır, bilgisayarla yapılan simülasyon çalışmalarında çözüm süresi artar. Bu nedenle de pek tercih edilmezler. Üstelik polinom denklemleri ile temsil edilen FV pil I-V karakteristiğinin gerçek karakteristiğe uyumluluğu Denklem (1) den türetilen diğer modellere göre daha azdır. Yani modelleme hatası daha fazladır.

FV güneş pillerinin kullanıldığı sistemlerin dinamik simülasyonu yapılırken doğal olarak FV pilin de bir dinamik (geçici durum) modeline ihtiyaç vardır. Literatürde, temelde aynı olsa da, birbirinden bazı farklılıklar gösteren dinamik modellere rastlamak mümkündür. Örneğin Şekil 1 deki şönt dirence paralel bağlı bir kondansatöre [3] ya da Şekil 2 de görüldüğü gibi doğrudan çıkış terminallerine paralel bağlı bir kondansatöre [2] sahip dinamik FV pil modelleri kullanılmaktadır.



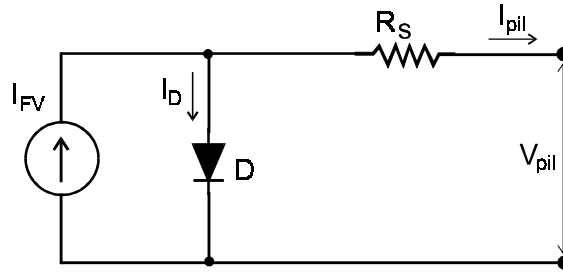
Şekil 2. FV güneş pilinin dinamik modeli.

Referans [2] deki karşılaştırmaların sonucuna göre FV güneş pilinin statik ve dinamik modellerden elde edilen akım ve gerilimi temelde hemen hemen aynı olmaktadır. Dolayısıyla FV pil modeline kondansatör dahil ederek işlemleri zorlaştırmak gereksizdir. Hatta bir çok çalışmada dinamik model yerine statik model kullanma yoluna gidilmiştir [5]. Bu durumda dinamik model yerine statik model kullanmanın sonucu etkilemeyeceği açıktır.

Şekil 1 deki şönt direnç R_{SH} , seri direnç R_S den çok daha büyük olduğu için, Denklem (1) deki son terim I_{pil} akımı ile kıyaslandığında oldukça küçük kalır ve ihmal edilebilir. Bu ihmal yapılırsa, Denklem (1), yerine,

$$I_{pil} = I_{FV} - I_D \left[\exp\left(\frac{e}{kT_{pil}} (V_{pil} + R_S \times I_{pil})\right) - 1 \right] \quad (3)$$

denklemini kullanılabilir. Benzer şekilde, şönt direnç ihmal edildiği için, Şekil 1 de verilen devre yerine Şekil 3 de verilen basit eşdeğer devre kullanılabilir. Referans [2] de yapılan karşılaştırmalar sonucunda, Şekil 1 ve Denklem (1) in temsil ettiği eşdeğer devre ile Şekil 3 ve Denklem (3) ün temsil ettiği eşdeğer devre arasında önemli bir fark ortaya çıkmamıştır. Dolayısıyla, bundan sonraki kısımlarda FV güneş pili, Şekil 3 de verilen ve Denklem (3) ile temsil edilen eşdeğer devresi kullanılarak incelenecektir.



Şekil 3. FV güneş pilinin basite indirgenmiş eşdeğer devresi.

Şekil 1, 2 ve 3 de I_D olarak işaretlenen akım, FV pili oluşturan yarıiletken malzemelerin P-N birleşme noktasından akan bir iç akım olup, pilin mutlak sıcaklığı, terminal gerilimi ve yük tarafından çekilen akımın bir fonksiyonu olarak değişir. Bu akım Denklem (4) ile ifade edilebilir.

$$I_D = I_0 \exp \left[\frac{e}{A k T_{pil}} (V_{pil} + R_S \times I_{pil}) \right] - I_0 \quad (4)$$

FV pil akımı aynı zamanda yükün çektiği akım olduğundan, FV güneş pilinin simulasyonunda yük akımı pil akımı olarak alınıp, pil akımı biliniyor kabul edilebilir. Dolayısıyla Denklem (1) ve (3) de pil akımının pil gerilimine bağlı olarak verildiği $I_{pil}=f(V_{pil})$ biçimindeki denklemler yerine $V_{pil}=f(I_{pil})$ biçiminde pil gerilimini akımın fonksiyonu olarak veren denklemlerin kullanılması daha uygun olur. Denklem (3) den hareketle, FV güneş pilinin gerilimi, akıma bağlı olarak aşağıdaki gibi elde edilebilir.

$$V_{pil} = \frac{A \times k \times T_{pil}}{e} \ln \left(\frac{I_{FV} + I_0 - I_{pil}}{I_0} \right) - R_S \times I_{pil} \quad (5)$$

Denklem (5) de verilen A katsayısı bir eğri uydurma faktörü olup bu denklemden elde edilecek olan I-V karakteristiğinin deneysel olarak elde edilen gerçek I-V karakteristiğine uyumunu sağlamak için kullanılmaktadır. Denklem (5) ile verilen ifade bir tek FV pilin çıkış gerilimini temsil eder. Eğer bir tek pil yerine bir çok pilin seri-paralel gruplar halinde bağlanmasıyla oluşturulan FV pil panelinin çıkış gerilimi hesaplanacaksa, aşağıda sıralanan işlemlerin yerine getirilmesi gerekir [5,6].

- i. Önce yük akımı paralel kol sayısına (N_p) bölünerek bir tek pilden akan akım bulunur.
- ii. Sonra da elde edilen bu akım Denklem (5) de kullanılarak bir tek pilin ürettiği gerilim elde edilir.
- iii. Son olarak da Denklem (5) ile belirlenen pil gerilimi, paralel bağlı kollardan birindeki seri bağlı pil sayısı (N_s) ile çarpılarak panelin çıkış gerilimi bulunmuş olur.

Şunu belirtmek gerekir ki, eğer seri olarak bağlı FV pillerinin kısadevre akımları birbirlerinin aynı, ya da birbirlerine çok yakın değilse problemler meydana gelir. Yani, kısadevre akımları arasındaki fark büyükse, kısadevre akımı düşük olan pil bozularak (yanarak) terminallerinde ters gerilim meydana getiren bir diyot gibi davranır. Düşük kısadevre akımına sahip pilin ters gerilimden korunması için bu pilin uçları arasına bir bypass diyodu (geçiş yolu) bağlanarak akım için bir alternatif yol oluşturulur.

3. Çalışma Sıcaklığı ve Güneş Seviyesindeki Değişimlerin FV Pil Üzerindeki Etkilerinin Modellenmesi

Denklem (5), pilin sadece belirli bir T_{pil} P-N birleşim noktası sıcaklığı ve belirli bir S_{pil} güneş (güneş radyasyonu) seviyesi için geçerlidir. Eğer FV pilin birleşim noktası sıcaklığı ya da güneş seviyesinde bir değişim olursa pilin ürettiği gerilim ve akım da buna bağlı olarak değişir. Dolayısıyla güneş ve pil sıcaklığında meydana gelen değişimlerin etkileri de FV güneş pilinin simulasyon modeline dahil edilmelidirler. Bu değişimlerin etkileri farklı biçimlerde simulasyon modeline eklenebilir. Bunlardan bazıları [1 ve 6] nolu kaynaklarda verilmektedir. Bu yöntemlere göre bilinen bir çalışma sıcaklığı ve güneş seviyesinde deneysel olarak bir pilin I-V karakteristiği elde edilip, referans I-V karakteristik olarak kullanılır. Şöyle ki, bu referans I-V karakteristik farklı çalışma sıcaklığı ve güneş seviyeleri için yeniden düzenlenir. Bazı uygulamalarda paneldeki pillerin seri-paralel bağlantı konfigürasyonları hava koşullarına göre değiştirildiği için panelin değil de bir tek pilin I-V karakteristiğini referans almak doğru olur. Çünkü bir tek pile ait I-V karakteristik değişen hava koşullarına göre yeni biçimini alınca bu karakteristik seri bağlı pil ve paralel bağlı seri pil kol sayıları dikkate alınarak, panalin I-V karakteristiğine genelleştirilebilir. Referans I-V karakteristik ve bunun matematiksel bağıntısı olan Denklem (5) deki katsayı ve parametrelerin belirlenmesinde izlenen basamaklar aşağıda sıralanmıştır.

4. FV Güneş Pilinin Referans I-V Karakteristikleri

Referans I-V karakteristik elde edilirken, FV pil panelinde kullanılacak pillerden birisi üzerinde test yapılarak, bu pile ilişkin I-V karakteristik belirli bir çalışma sıcaklığı T_{pil} , ve güneş şiddeti S_{pil} değerleri için elde edilir. Tabii burada, panelde kullanılan bütün FV pillerin aynı elektrik özelliklere sahip oldukları kabul edilmektedir. Aynı özelliklere sahip olmaları gerektiği de daha önce belirtilmişti. FV pilin I-V karakteristiğini deneysel olarak elde etmek için;

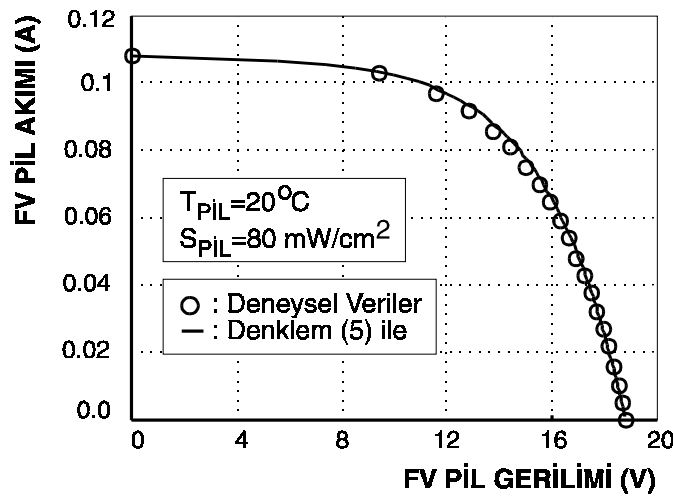
1. Ayarlanabilir bir direnç FV güneş pilinin çıkış terminaleri arasına bağlanır ve değişik direnç değerlerinde çıkıştaki V_{pil} gerilimi ve I_{pil} akımı ölçülerek kaydedilir.
2. FV pilin kısadevre akımı I_{kd} (ayarlanabilir direncin değeri sıfır) ve açık devre gerilimi V_{ad} (ayarlanabilir direnç açıkdevre) 1. adımda elde edilen verilerden belirlenir.

$$\begin{array}{ll} V_{pil}=0.0 & \text{iken } I_{kd}=I_{pil} \\ I_{pil}=0.0 & \text{iken } V_{kd}=V_{pil} \end{array}$$

3. Kısadevre sırasında diyodun ters doyma akımı I_0 kısadevre akımına kıyasla çok daha küçük olduğu için ihmal edilebilir. Bu durumda FV pilin fotoakımı I_{FV} , kısadevre akımı I_{kd} na eşit kabul edilerek işlem yapılabilir.
4. Diyodun ters doyma akımı I_0 için çok küçük rastgele bir değer alınır.
5. Referans I-V karakteristiğini belirlemek için yapılan test sırasında çalışma sıcaklığı T_{pil} ve güneş radyasyonu (ışığı) seviyesi S_{pil} değerlerini belirlemek gerekir. Burada ele alınan referans I-V karakteristiğe ilişkin test esnasında bu değerler sırasıyla, $T_{pil}=20^\circ\text{C}$ ve $S_{pil}=80 \text{ mW/cm}^2$ olarak tesbit edilmiştir.
6. Referans I-V karakteristiği deneysel olarak elde edildikten sonra, bu karakteristiği verecek şekilde Denklem (5) deki bilinmeyen R_S seri direnci, I_0 diyodun ters doyma akımı ve A eğri uydurma katsayısı deneme-yanılma yada

eğri uydurma yöntemleri kullanılarak belirlenir. Bu üç bilinmeyen, deneysel I-V eğrisinin maksimum güç noktası civarlarından alınan üç noktaya ilişkin verilerin Denklem (5) de kullanılmasıyla elde edilecek üç doğrusal olmayan denklem takımının çözülmesiyle de belirlenebilir. Bu çözüm sırasında da I_{FV} fotoakımı, I_{kd} kısadevre akımına eşit kabul edilebilir. Denklem (5) deki bütün değerler belirlenince bu denklem referans I-V karakteristiğini veren ve bilgisayar simulasyonunda FV pili matematiksel olarak temsil eden referans denklem olarak kullanılır.

Deneysel olarak ölçülen ve Denklem (4) ile hesaplanan referans I-V karakteristiklerinin son biçimleri Şekil 4 de verilmektedir. Unutulmamalı ki bu I-V karakteristik sadece 20°C lik bir çalışma sıcaklığı ve 80 mW/cm² lik bir güneş radyasyonu (güneş ışığı) seviyesi için geçerlidir. Farklı çalışma sıcaklığı ve farklı güneş ışığı seviyeleri için bu karakteristiğin yeniden düzenlenmesi gerekir.



Şekil 4. FV güneş pilinin ölçülen ve hesaplanan referans I-V karakteristikleri.

5. Referans I-V Karakteristiğın Değişen Çalışma Sıcaklığı Ve Güneş Işığı Seviyeleri İçin Yeniden Belirlenmesi

Bilinen T_{pil} çalışma sıcaklığı ve S_{pil} güneş radyasyonu seviyesi için Denklem (5) temel denklem olarak alınabilir. Güneş panelinin bulunduğu ortamın sıcaklığı ve güneş radyasyonu seviyesi değişince, paneldeki FV pillerin çalışma sıcaklığı T_{pil} de değişerek yeni bir fotoakımı ve yeni bir çıkış gerilimi oluşturur. FV pillerin çalışma sıcaklığı, güneş radyasyonu seviyesi ve ortamın sıcaklığına bağlı olarak değişir. Değişken ortam sıcaklığı T_x pilin çıkış gerilimi ve fotoakımını etkiler. Bu etkiler, aşağıda açıklandığı gibi, pil modelinde sırasıyla sıcaklık gerilim ve akım katsayıları C_{TV} ve C_{TI} ile temsil edilmektedirler [6,7,8,9].

$$C_{TV} = 1 + \beta_T (T_a - T_x) \quad (6)$$

$$C_{TI} = 1 + \frac{\gamma_T}{S_{pil}} (T_x - T_a) \quad (7)$$

Burada T_a test sırasında bilinen referans ortam sıcaklığını temsil etmektedir ve 20°C olduğu varsayılmıştır. T_x farklı zamanlardaki farklı ortam sıcaklıklarını temsil eder. β_T ve γ_T katsayıları ise sırasıyla sıcaklık nedeniyle pil gerilimi ve akımında meydana gelen değişimlerin eğimlerini temsil etmektedirler. Bu β_T ve γ_T katsayıları FV pil tipine bağlı olarak değişir ve deneysel olarak belirlenirler. Normalde β_T 0.004 ile 0.006 arasında, γ_T ise 0.02 ile 0.1 arasında değerler alır [6].

Hernekadar gün boyunca ortam sıcaklığı önemli ölçüde değişmese de, güneş radyasyonu seviyesi, günışığı miktarı ve havanın bulutluluk durumuna bağlı olarak etkin biçimde değişerek FV pilin fotoakımını ve çalışma sıcaklığını, dolayısıyla da çıkış gerilimini etkiler. Eğer güneş radyasyonu seviyesi S_{C1} gibi bir değerden S_{C2} gibi bir değere değişirse, çalışma sıcaklığı T_{C1} den T_{C2} ye, fotoakım ise I_{FV1} den I_{FV2} ye değişir. Böylece, güneş radyasyonu seviyesindeki değişimin pil fotoakımı ve çıkış gerilimi üzerindeki etkileri iki ayrı düzeltme katsayısı ile ifade edilir. Bu düzeltme katsayıları çıkış gerilimi için C_{SV} fotoakım için ise C_{SI} ile verilmekte ve sırasıyla Denklem (8) ve (9) ile tanımlanmaktadır [7,8].

$$C_{SV} = 1 + \beta_T \times \alpha_s (S_x - S_{pil}) \quad (8)$$

$$C_{SI} = 1 + \frac{1}{S_{pil}} (S_x - S_{pil}) \quad (9)$$

Burada, S_{pil} referans güneş radyasyon seviyesi olarak kullanılan günışığı şiddetidir. S_x ise farklı zamanlardaki farklı güneş radyasyon seviyelerini temsil etmektedir. α_s , güneş radyasyon seviyesindeki değişimin pil çalışma sıcaklığında meydana getireceği değişime ait bir katsayı olup Denklem (10) ile tanımlanır [6,7,8].

$$\alpha_s = \frac{\Delta T_{pil}}{S_x - S_{pil}} = \frac{T_{pil} - T_a}{S_x - S_{pil}} \quad (10)$$

α_s nin değeri, aynı özelliklere sahip olmayan FV piller için farklıdır, ve deneysel olarak belirlenir. Ancak bu değer genellikle 0.3 ile $0.4 \text{ }^\circ\text{C cm}^2/\text{mW}$ arasındadır [6].

Yukarıda verilen düzeltme katsayıları C_{TV} , C_{TI} , C_{SV} ve C_{SI} kullanılarak FV pilin yeni çıkış gerilimi V_{Xpil} ve yeni fotoakımı I_{XFV} , yeni çalışma sıcaklığı T_x ve yeni güneş radyasyonu seviyesi S_x için aşağıdaki gibi belirlenir [7,8].

$$V_{Xpil} = C_{TV} \times C_{SV} \times V_{pil} \quad (11)$$

$$I_{XFV} = C_{TI} \times C_{SI} \times I_{FV} \quad (12)$$

Burada, C_{TV} ve C_{TI} Denklem (6) ve (7) de verildiği gibi ortam sıcaklığındaki değişimin sırasıyla pil gerilimi ve akımı üzerindeki etkilerini, C_{SV} ve C_{SI} ise Denklem (8) ve (9) da verildiği gibi, güneş radyasyonu seviyesindeki değişimin sırasıyla pil gerilimi ve akımı üzerindeki etkilerini temsil ederler. Bu ifadelerdeki V_{pil} ve I_{FV} ise referans alınan pil çalışma sıcaklığı ve günışığı (güneş radyasyonu) seviyelerindeki pil çıkış gerilimi ve fotoakımının değerleridir. Daha önce de belirtildiği gibi, kısadevre sırasında diyodun I_0 ters doyma akımı, I_{FV} fotoakımına kıyasla çok küçüktür ve ihmal edilebilir. Dolayısıyla I_{FV} fotoakımı, I_{kd} kısadevre akımına eşit alınabilir [2,7,8]. Böylece her yeni I_{XFV} fotoakımı değerine karşılık, I-V karakteristiğinde yeni bir I_{Xkd} kısadevre akımı değeri olacaktır.

5. Sonuç ve Değerlendirmeler

FV güneş pilleri klasik DA kaynaklarından farklı akım-Gerilim karakteristiklerine sahiptir. Bu nedenle de farklı eşdeğer devre modelleri gerektirirler. Farklı güneş radyasyonu ve ortam sıcaklıklarında farklı akım-gerilim karakteristikleri meydana geldiğinden, güneş radyasyonu ve ortam sıcaklığında meydana gelen değişimlerin etkileri de eşdeğer devre modellerine dahil edilirler. Ayrıca yapılan çalışmalar göstermiştir ki; FV güneş pillerinin statik eşdeğer devre modelleri dinamik model olarak da kullanılabilirler. Bunun en büyük nedeni de güneş radyasyonu ve ortam sıcaklığında meydana gelen değişimlerin sistem dinamiği bakımından çok yavaş olmalarıdır.

Kaynaklar

- [1]. H.S. Rauschenbach, "Solar Cell Array Design Handbook-The Principles and Technology of Photovoltaic Energy Conversion", Van Nostrand Reinhold Company, 1980.
- [2]. Y.Yao, R.S. Ramshaw, and E. Bustamante, "A Review of Photovoltaic Models", Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, September 25-27, 1991, Quebec City, Quebec, Canada, pp. 56.3.1-56.3.4.
- [3]. J.Fitzer and W.E.Dillon, "Impact of Residential photovoltaic Power Systems on the Distribution Feeder", *IEEE Trans., Vol. EC-1*, No. 4, December 1986, pp.39-42.
- [4]. W.Z.Fam and M.K.Balachander, "Dynamic Performance of a DC Shunt Motor Connected to a Photovoltaic Array", *IEEE Trans. Vol. EC-3*, No.3, September 1988, pp.613-617.
- [5]. J.Appelbaum, "The Quality of Load Matching in a Direct-Coupling Photovoltaic System", *IEEE Trans. Vol. EC-2*, No.4, December 1987, pp.534-541.
- [6]. M. Buresch, "Photovoltaic Energy Systems Design and Installation", McGraw-Hill, Inc., 1983.
- [7]. İ. H. Altaş, "Control Strategies For Maximum Power Tracking And Energy Utilization Of A Stand-Alone Photovoltaic Energy System", Doktora Tezi, The University of New Brunswick, Faculty of Engineering, Department of Electrical Engineering, Fredericton, New Brunswick, Canada, 1993.
- [8]. İ. H. Altaş and A. M. Sharaf, "A Fuzzy Logic Power Tracking Controller For A Photovoltaic Energy Conversion Scheme", *Electric Power Systems Research*, Vol.25, No.3, 1992, pp.227-238.
- [9]. İ.H. Altaş 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.