

Fotovoltaik Panelin Tek Diyotlu Eşdeğer Devresine Ait Büyük Sinyal Analizi

Onur Kircioğlu¹

Ali Bekir Yıldız²

Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,
Elektrik Mühendisliği Bölümü, Kocaeli

¹ onurk.oglu@gmail.com

² abyildiz@kocaeli.edu.tr

Özet

Bu çalışmada, bir fotovoltaik (FV) panel, güç dönüştürücüsü ve yük elemanından oluşan sistemin büyük sinyal analizi gerçekleştirilmiştir. FV panelin eşdeğer devresindeki tek diyota ilişkin olarak Newton-Raphson yöntemine karşı düşen Ayırık eşdeğer devre modeli kullanılmıştır. Elde edilen lineerleştirilmiş model yardımıyla, panele ilişkin çeşitli karakteristikler elde edilmiştir. FV panel ile Boost Dönüştürücünün beraber çalıştığı durumda, iletim oranına (D) bağlı olarak çalışma noktasının değişimi gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Fotovoltaik panel, Tek diyotlu eşdeğer devre, Büyük sinyal analizi, Newton-Raphson yöntemi, Boost Dönüştürücü.

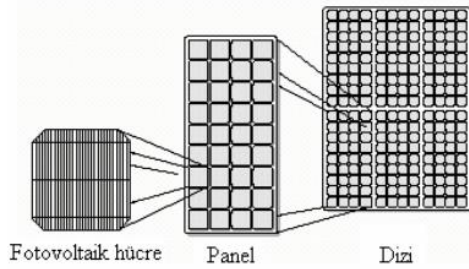
1. Giriş

Dünya nüfusunun her geçen gün artması ve teknolojinin gelişmesiyle beraber elektrik enerjisi tüketimi sürekli artmaktadır. Bununla beraber elektrik enerjisi üretiminde kullanılan kömür, doğalgaz gibi fosil yakıtların rezervlerinin sınırlı olması ve hızla tükenmesi, yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgiyi artırmıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının başında güneş ve rüzgâr enerjisi gelmektedir.

Güneş enerjisinden elektrik üretimi, temel olarak iki yöntemle yapılmaktadır [1-2]:

- Güneş ısısından faydalanılarak elektrik üretimi
- FV sistemler ile elektrik üretimi

FV hücreler, güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine çeviren yarıiletken elemanlardır. Gerekli güç ihtiyacına göre FV hücreler, seri-paralel bağlanarak FV panel oluşturulabilir. FV paneller de seri-paralel bağlanarak FV diziler oluşturulabilir (Şekil 1). FV hücreler, FV paneller ve FV diziler kullanılarak, cep telefonu şarj cihazından MW'lar mertebesinde elektrik santrali gibi birçok uygulama alanında tasarımlar yapılmaktadır.



Şekil 1. FV hücre, FV panel ve FV dizi

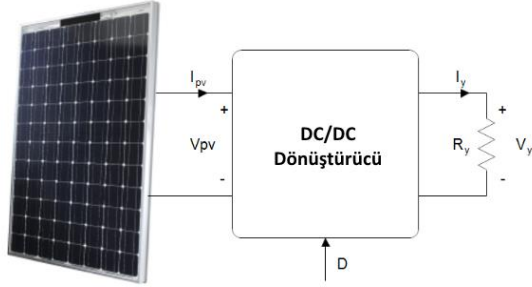
FV sistemler yakıt maliyetinin olmaması, güvenilir olması, hareketli parça içermemesi, bakım maliyetlerinin çok düşük olması ve çevre kirliliğine yol açmaması gibi birçok avantaja sahiptir. Bu avantajlarına karşılık ilk kurulum maliyetinin yüksek olması, verimlerinin düşük olması, elektrik enerjisinin depolanmasındaki zorluklar gibi dezavantajlara sahiptir. Bu nedenle FV sistemlerden maksimum gücü elde etmek önem kazanmaktadır.

FV hücreler yarıiletken malzemeden yapılırlar. Bu nedenle, karakteristiği doğrusal değildir. Sistem tasarımında ve analizinde, karakteristiğinin iyi bilinmesi gerekir. Bu açıdan FV hücrenin modellenmesi üzerinde, literatürde birçok yaklaşım yapılmıştır. Tek diyot modeli, çift diyot modeli, akbaba modeli, amipirik model vb. birçok eşdeğer devreler geliştirilmiştir [3-6]. Bu çalışmalarda, ağırlıklı olarak Matlab/Simulink tabanlı modeller oluşturulmuştur. Bu modeller arasında, tek diyotlu model çift diyotlu modele göre hesap kolaylığına sahip olduğundan ve diğer modellere göre daha gerçekçi sonuçlar verdiğinden en yaygın kullanılan modeldir. Ünlü vd. [7], bu eşdeğer modelindeki tek diyotun doğrusal olmayan karakteristiğine yakın bir karakteristik elde edebilmek için parçalı doğrusal diyot modeli geliştirmişlerdir.

Bu çalışmada tek diyotlu eşdeğer devre modeli kullanılarak, güneş paneli sisteminin büyük sinyal analizi gerçekleştirilmiştir.

2. Güneş paneli dönüştürücü sistemi

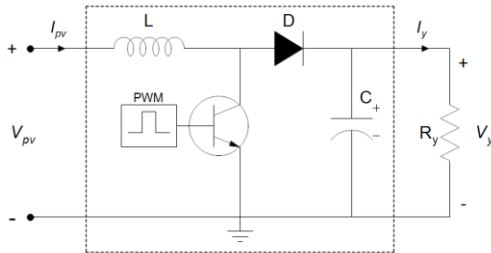
Güneş paneli dönüştürücü sisteminin temel yapısı, Şekil 2’de verilmiştir. Sistemin üç elemanı söz konusudur: FV hücre/panel, DC/DC dönüştürücü ve yük elemanı. Çalışmada, öncelikle, DC/DC dönüştürücü ve yük birlikte ele alınarak, güneş paneli tarafına yansıyan/ indirgenmiş eleman değeri belirlenmiştir. Daha sonra, FV hücre/paneli ile tüm sistemin birlikte düşünülmesi durumunda, lineerleştirilmiş model elde edilerek büyük sinyal analizi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2. Güneş paneli dönüştürücü sistemi

3. Güç Dönüştürücü Devresi

Çeşitli koşullar altında, güneş panelinin maksimum güç noktasında çalıştırılması istenir. Bu amaçla, güneş paneli ile yük arasında DC/DC dönüştürücü devreleri eklenir. DC/DC dönüştürücü olarak, genellikle Boost devresi kullanılır. Bu nedenle çalışmada, Boost yapısı ele alınmıştır (Şekil 3). Ancak, diğer yapılar için de analiz yöntemi geçerlidir. Şekil 2’deki sistemde, dönüştürücünün çıkışına bağlanan yükün, panel tarafına yansıyan/indirgenmiş değerinin belirlenmesinde güç dengesi kullanılır. Tüm ideal dönüştürücülerde olduğu gibi, Boost dönüştürücüde de giriş gücü çıkış gücüne eşittir [8-10]. Dönüştürücünün giriş gerilim-akım değerleri (dolayısıyla FV panelin çıkış gerilim-akım değerleri), V_{pv} , I_{pv} , yük tarafındaki çıkış gerilim-akım değerleri V_y , I_y olmak üzere denklemler elde edilecektir. R_y , yük direncini, R_g , dönüştürücünün girişinden görülen dolayısıyla panel tarafına indirgenmiş yük direncini ifade etmektedir.



Şekil 3. Boost Dönüştürücü devresi

$$P_{giris} = P_{cikis} \quad (1)$$

$$V_{pv}I_{pv} = V_yI_y \quad (2)$$

$$V_{pv} \frac{V_{pv}}{R_g} = V_y \frac{V_y}{R_y} \quad (3)$$

Boost dönüştürücüye ait çıkış gerilimi;

$$V_y = \frac{V_{pv}}{(1-D)} \quad (4)$$

şeklinde. Bu ifade, denk.(3)’de yerine konur.

$$\frac{V_{pv}^2}{R_g} = \frac{V_{pv}^2}{(1-D)^2 R_y} \quad (5)$$

Buradan, panel tarafına indirgenmiş yük direnci değeri belirlenir.

$$R_g = (1 - D)^2 R_y \quad (6)$$

Denk.(6)’da elde edilen R_g değeri, Şekil 2’deki sistemde, tek diyotlu FV hücre/panel tarafına indirgenmiş/yansıyan direnç eşdeğeridir.

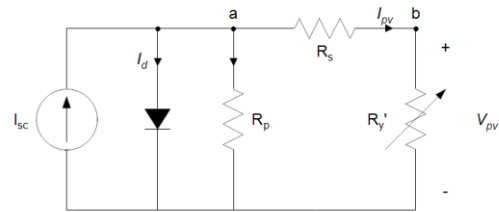
$$R'_y = R_g \quad (7)$$

Denk.(6)’dan görüldüğü gibi, güneş panel sistemini maksimum güç noktasında çalıştırmak için, Boost dönüştürücünün iletim oranı (D) değiştirilerek, istenen yük değerleri belirlenebilir.

4. FV Hücresinin Büyük-Sinyal Eşdeğer Devresi

Bir FV hücresinin tek diyotlu eşdeğer devresi Şekil 4’de görülmektedir. Bu model, 5 parametrelidir. Bu parametreler I_{sc} , I_s , R_s , R_p ve n ’dir. Burada, I_{sc} , FV hücre tarafından üretilen akımı, R_s , hücredeki iç direnci ve bağlantı dirençlerini, R_p direnci de paralel kaçak akım direncini temsil etmektedir. I_s ve n , diyota ilişkin büyüklüklerdir. Diyota ilişkin uç denklem, denk.(8)’de verilmiştir. Bu denklemde, I_s , diyot ters satürasyon akımını, q , bir elektron yükünü, n , diyot ideallik faktörünü, k , boltzman sabitini, T ise Kelvin cinsinden çalışma sıcaklığını ifade etmektedir. ($q=1,6 \cdot 10^{-19}$, $k=1,38 \cdot 10^{-23} \frac{J}{K}$, $n=1,2$).

$$I_d = I_s (e^{\frac{qV_a}{n k T}} - 1) \quad (8)$$



Şekil 4. Tek diyotlu FV hücre modeli

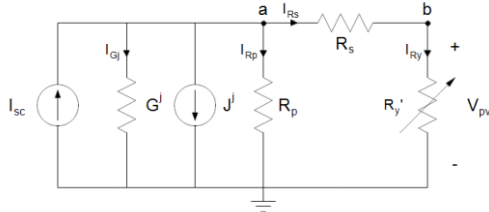
Şekil 4’deki R'_y , denk.(7) ile ifade edilen panel tarafına indirgenmiş direnç değeridir. Bu yük direncinin değeri, panelin çalışma noktasını belirler.

Diyotun uç denkleminde dolayı, devre lineer değildir. Devrenin büyük sinyal analizinin elde edilmesinde, Newton-Raphson yöntemi kullanılmıştır [11]. Bu yöntemde, lineer olmayan eleman her iterasyon adımında lineerleştirilerek, bir direnç ve akım kaynağı ile modellenir. Bu lineerleştirilmiş eleman değerleri, denk.(9)'a göre belirlenir.

$$G^j = \frac{dI_d}{dV_a} \quad (9.a)$$

$$J^j = I_d - G^j V_a \quad (9.b)$$

FV hücre modelindeki tek diyota ilişkin Newton-Raphson yöntemine karşı düşen ayırık eşdeğer devre elemanlarının (G^j , J^j) yerine konmasıyla, Şekil 5'deki devre elde edilir. Bu devrede, lineer olan devre parametreleri (R_s , R_p , I_{sc}) değişmeden aynen kalmıştır.



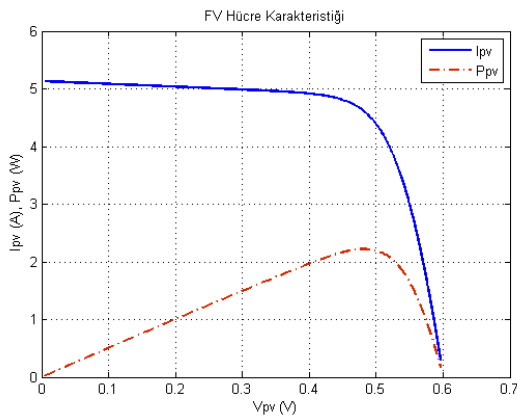
Şekil 5. Ayırık eşdeğer devre

Şekil 5'deki devreye ait düğüm denklemleri aşağıda verilmiştir. V_a ve $V_b = V_{pv}$ yöntemin bilinmeyenleri olarak görülmektedir.

$$a \rightarrow V_a G_p + (V_a - V_{pv}) G_s + J^j + G^j V_a - I_{sc} = 0 \quad (10.a)$$

$$b \rightarrow V_{pv} G_y' + V_{pv} G_s - V_a G_s = 0 \quad (10.b)$$

$|V_a^{j+1} - V_a^j| < \epsilon$ ve $|V_{pv}^{j+1} - V_{pv}^j| < \epsilon$ olana kadar iterasyona devam edilir. Bu koşul sağlandığında, çalışma noktasındaki değerler belirlenmiş olur. Panelin tüm yük durumlarındaki karakteristiğini elde etmek için, analizde $0 < R_y < \infty$ aralığında değiştirilmiştir (iletim oranı, $D=0$ alınmıştır). Böylece her R_y , dolayısıyla R_y' , değeri için çalışma noktasının bulunmasıyla elde edilen FV hücre karakteristiği Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Lineerleştirilmiş duruma ait panel karakteristiği

Lineer olmayan modelde sabit olarak görülen I_{sc} ve I_s akımları, güneş ışınımına ve sıcaklığa bağımlı olarak değişmektedir. Bu akımlara ilişkin ifadeler aşağıda verilmiştir.

$$I_{sc} = \frac{((t-25) \cdot K_i \cdot I_{scr} + I_{scr}) \cdot G}{1000} \quad (11)$$

Burada, t çalışma sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$), K_i , sıcaklık katsayısı, G ise güneş ışınımıdır.

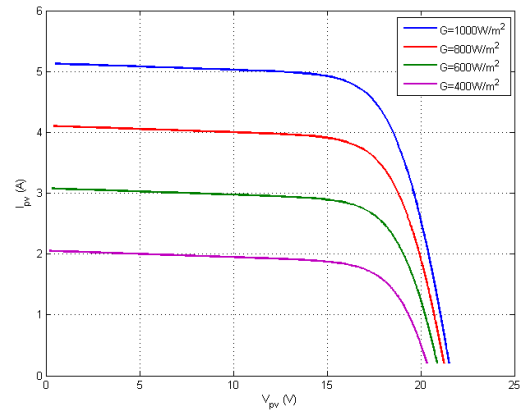
$$I_s = \left(\frac{T}{298}\right)^3 e^{\left(\frac{E_g q}{nk}\right)\left(\frac{1}{298} - \frac{1}{T}\right)} \quad (12)$$

Burada, E_g malzemenin bant aralığı enerjisidir ($E_g = 1.1\text{eV}$), T çalışma sıcaklığıdır ($^{\circ}\text{K}$). Hücreler seri veya paralel bağlanarak FV panel elde edilir. Seri bağlı hücre sayısı (N_s) ve paralel bağlı hücre sayısı (N_p) denklemlere katılarak, FV panelin karakteristiği elde edilebilir.

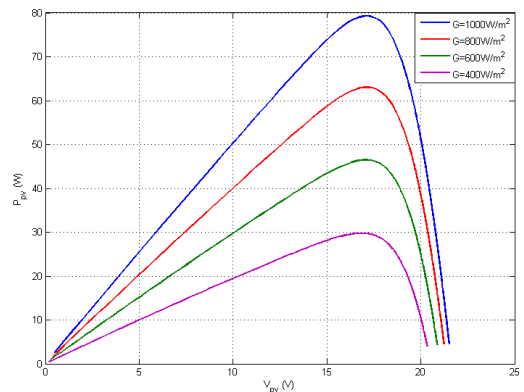
$$I_{sc} = N_p I_{sc} \quad (13)$$

$$I_d = N_p I_s (e^{\frac{qV_d}{nkTN_s}} - 1) \quad (14)$$

Bu değişiklikler yapıp iterasyon tekrarlandığında, çeşitli sıcaklık ve ışınım değerlerinde elde edilen FV panel karakteristikleri aşağıda verilmiştir.

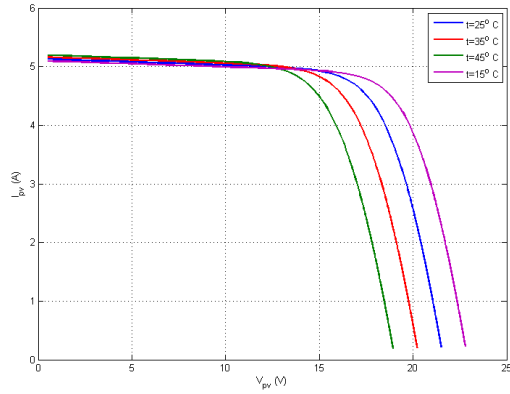


Şekil 7. Işınımına bağlı panel I-V karakteristiği

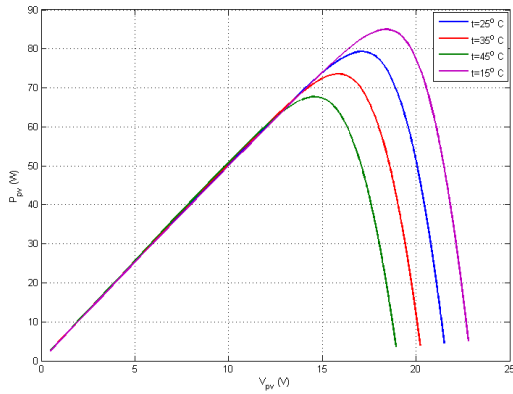


Şekil 8. Işınımına bağlı panel P-V karakteristiği

Şekillerde görüldüğü gibi güneş ışınımına bağlı olarak elde edilen panel akımı, dolayısıyla üretilen güç doğru orantılı olarak değişmektedir.



Şekil 9. Sıcaklığa bağlı panel I-V karakteristiği



Şekil 10. Sıcaklığa bağlı panel P-V karakteristiği

5. İletim Oranına Göre Analiz

Şekil 2'deki güneş paneli sisteminde, belli bir yük değeri için iletme oranına bağlı olarak da analiz gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, panel tarafına indirgenmiş R'_y değerleri, Şekil 5'deki ayırık eşdeğer devrede ve denk.(10)'da yerine konarak, iteratif olarak çalışma noktası değerleri belirlenmiştir.

Tablo 1'de, belli bir yük direnci için, iletme oranına (D) bağlı olarak panelin çalışma noktası değerleri ve panelden elde edilen güç değerleri görülmektedir.

$R_y = 10\Omega$ için;

D	$R'_y (\Omega)$	$I_{pv} (A)$	$V_{pv} (V)$	$P_{pv} (W)$
0	10	2.035	20.384	41.55
0.1	8.1	2.477	20.063	49.69
0.2	6.4	3.059	19.579	59.90
0.3	4.9	3.828	18.756	71.80
0.4	3.6	4.691	16.889	79.24
0.5	2.5	4.996	12.490	62.40

Tablo 1. İletim oranına bağlı çalışma noktası değerleri

6. Sonuçlar

Bu çalışmada, güneş panel sisteminin büyük-sinyal analizini elde etmek amacıyla, lineer olmayan diyot elemanı lineerleştirilerek, bir direnç ve akım kaynağı ile modellenmiştir. Lineerleştirilmiş modelin kullanılması ile elde edilen çözümlerin, gerçek FV hücre modeline çok yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. Bu nedenle, elde edilen bu Ayırık devre modeli ile fotovoltaik enerji dönüşüm sistemlerinde maksimum güç noktası izleme gibi çeşitli uygulamalar gerçekleştirilebilir.

Güneş ışınımı ve sıcaklık, devredeki bazı parametreleri etkilemekte ve panel karakteristiğini değiştirmektedir. Bu etkileri gözlemleyebilmek için aynı model kullanılarak farklı ışınım ve sıcaklıklarda panelin I-V ve P-V karakteristikleri elde edilmiştir.

7. Kaynaklar

- [1] H. Hüseyin Öztürk, "Güneş Enerjisi ve Uygulamaları", *Birsan Yayınevi*, 2012.
- [2] H. Hüseyin Öztürk, Durmuş Kaya, "Güneş Enerjisinden Elektrik Üretimi: Fotovoltaik Teknoloji", *Umuttepe Yayınları*, 2013.
- [3] N. Pandiarajan, R. Muthu, "Mathematical Modeling of Photovoltaic Module with Simulink", *International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES 2011)*.
- [4] M. Petkov, D. Markova, St. Platikanov, "Modeling of electrical characteristics of photovoltaic power supply sources", *Contemporary Materials (Renewable energy sources)*, 2011.
- [5] T. Salmi, M. Bouzguenda, A. Gastli, A. Masmoudi, "MATLAB/Simulink Based Modelling of Solar Photovoltaic Cell", *International Journal of Renewable Energy Research*, 2012.
- [6] Selen Çekirir, "Fotovoltaik Güç Sistemlerinin Modellenmesi ve Benzetimi", *Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi*, 2012.
- [7] M. Ünlü, S. Çamur, B. Arifoğlu, "Devre Temelli Fotovoltaik Hücre Modeli", *VI. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu*, 2011.
- [8] Muhammad H. Rashid, "Power Electronics Handbook: Devices, Circuits, Applications" Elsevier, 3rd. Edition, 2011.
- [9] Robert W. Erickson, Dragan Maksimovic, "Fundamentals of Power Electronics" 2nd. Edition, 2001.
- [10] N. Mohan, T. Undeland, W. Robbins, "Güç Elektronikleri: Çeviriciler, Uygulamalar ve Tasarım", *Literatür Yayınları (Çeviri)*, 2003.
- [11] Ali Bekir Yıldız, "Elektrik Devrelerinin Bilgisayar Destekli Analizi", *Yüksek Lisans Ders Notları, Kocaeli Üniversitesi*, 2014.