

Üç Fazlı Fotovoltaik Eviricinin P&O ve DQ Tabanlı Kontrol Yöntemi Kullanılarak Kontrolü

Yasemin Onal¹

Özet

Gün geçtikçe dünyadaki insan nüfusu arttıkça kullanılan elektrik enerjisi de artış göstermektedir. Günümüzde temiz enerji kullanımını hedefleyen birçok ülkede ve üniversite kampüsünde fotovoltaik (FV) sistemler kullanılarak yüksek oranda enerji tasarrufu yapılmakta ve çevreye zarar veren gaz emisimi azaltılmaktadır. Son çeyrek asırda ilk yatırım masraflarında sağlanan düşüişlere paralel olarak, FV sistemlerin hızla artan bir kullanımı söz konusudur. FV sistemler üniversite aydınlatması, üç fazlı eviriciler, sulama sistemleri, çiftlik evleri, şebekeden uzak binalar, uzay araçları, askeri uygulamalar gibi birçok alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Fakat sistem tasarımları, teknolojideki gelişmeler ve çevresel faktörler ile beraber üretilen elektrik enerjisinde harmonik, gerilim çökmesi, gerilim yükselmesi gibi güç kalitesi bozulmaları oluşmaktadır. Oluşan bozulmalar FV güç sistemi çıkışındaki güçte kayıplara neden olmaktadır. Bu çalışmada, FV evirici sisteminden maksimum güç elde edebilmek, elde edilen gerilim ve akımdaki bozulmaları azaltabilmek ve FV sistemden elde edilen gücü AC şebekeye aktarabilmek için Değişir & Gözle (P&O) MPPT algoritması ve DQ algoritmasından oluşan akım kontrol yöntemi önerilmiştir. Şebekeye bağlı eviricilerde kullanılan referans akım sinyali, P&O algoritması kullanılarak elde edilmekte ve güç sisteminde kullanılan aktif anahtarların PWM sinyalleri senkron DQ algoritması kullanılarak üretilmektedir. Böylece eviricide elde edilen güç önerilen yöntem tarafından kontrol edilmektedir. Önerilen yöntemin MPP izleme başarısı, P&O algoritması ve DQ algoritmasının birleştirilmesi ile geliştirilmiştir. MATLAB/Simulink programı kullanılarak değişken ışınımlı FV beslemeli üç fazlı şebeke bağlantılı bir eviricinin simulasyon çalışması yapılmış ve yöntemin doğruluğu, simüle edilen sistemde güç verimliliği ve harmonikler analizi yapılarak test edilmiştir. Önerilen akım kontrol yöntemi kullanılarak elde edilen sonuçlardan şebeke akımındaki toplam harmonik bozulma değerinin 2.74% olduğu görülmektedir. Bu değer harmonik standartlarda yer alan değer aralığında bulunmaktadır.

1 Doç. Dr. Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Gülümbe Kampüsü, Bilecik, Türkiye, yasemin.onal@bilecik.edu.tr, ORCID ID: 0000-0003-0173-0948

1. Giriş

Fosil kaynaklardan elde edilen elektrik enerjisinin çevresel etkilerini azaltmak amacıyla dünya genelinde yenilenebilir enerji kaynakları ve yeni teknolojik sistemlerin kullanımı artmaktadır. Bu kapsamda güneş enerjisi sistemlerinin kurulum maliyetlerindeki azalma, fotovoltaik (FV) panel sistemlerinin kullanımını yaygınlaştırmıştır (Østergaard ve ark., 2022; Sabo ve ark., 2022). Türkiye, bu küresel eğilime paralel olarak güneş enerjisi sistemlerinin benimsenmesinde önemli bir artış yaşamaktadır. Ülke genelinde büyük ölçekli güneş enerjisi tesisleri bulunmasa da, Mayıs 2019'a kadar kurulan sistemlerin toplam kapasitesi 53746 MW seviyesine ulaşmıştır (Akçay, 2020).

Son yıllarda, güneş enerjisiyle elektrik üretimi alanında araştırmalar hızla gelişmekte ve özellikle Fotovoltaik (FV) enerji sistemleri üzerine yapılan tasarım ve kontrol çalışmaları artmaktadır (Zhang ve ark., 2022; Al-Shahri ve ark., 2022). FV enerji sistemleri, doğrusal olmayan yapılarıyla bilinirler. Bu sistemlerde, tek tip güneş ışığı altında belirli bir akım-gerilim karakteristiği ve buna bağlı olarak güç-gerilim karakteristiğinde tek bir maksimum güç noktası (MGN) bulunmaktadır. Ayrıca, bu MGN'nin konumu güneş ışınımı ve sıcaklık seviyelerine bağlı olarak değişmektedir. Kaynaklar ile yük arasındaki güç farklılıkları, FV sistemlerinden elde edilebilecek maksimum gücü kısıtlamakta ve önemli güç kayıplarına sebep olmaktadır. MGN takibi (MGNİ), FV sistemlerinden maksimum güç almak için yapılan optimizasyon çalışmalarını ifade etmektedir (Boghdady ve Mohamed, 2023).

Literatürde, FV evirici sistemlerden maksimum gücü elde etmek için birçok MGNİ algoritması bulunmaktadır. Bu geleneksel yöntemler arasında Değiştir & Gözle (P&O) (Ahmad ve ark., 2019; Saravanan ve Babu, 2016), tepe tırmanma (HC) (Bendib ve ark., 2015; Danandeh ve ark., 2018), artımlı iletkenlik (IC) (Kjaer, 2012), artımlı direnç (IR) (Podder ve ark., 2019) ve bulanık mantık (FL) (Rezk ve ark., 2017) algoritmaları bulunmaktadır. Bu algoritmalar genellikle hesaplanan yeni çıkış gücünü önceki panel çıkış gücü ile karşılaştırarak bir referans sinyali üretmektedir. Ancak, tek tip güneş ışınımı altında olan FV sistemler için uygun olup, değişken koşullarda verimli çalışmazlar.

FV sistemlerinden maksimum güç çıkışını artırmak ve evirici sistemin verimliliğini artırmak için meta-sezgisel optimizasyon algoritmaları, yapay sinir ağları (ANN) ve bulanık mantık denetleyici (FLC) gibi akıllı algoritmalar kullanılmaktadır (Rezk ve ark., 2017; Ali ve ark., 2021; Zafar ve ark., 2021; Daraban ve ark., 2014; Radjai ve ark., 2014). Ancak, bu algoritmaların etkin kullanımı için FV enerji sistemine dair detaylı bilgiye

sahip olmak ve ışınlım, sıcaklık, açık devre gerilimi, kısa devre akımı gibi panelin çeşitli parametrelerini online olarak ölçmek gerekmektedir. Ayrıca, FLC tabanlı algoritmalar için ilgili parametrelerin belirlenmesi uzman bilgisini gerektirmektedir (Radjai ve ark., 2014).

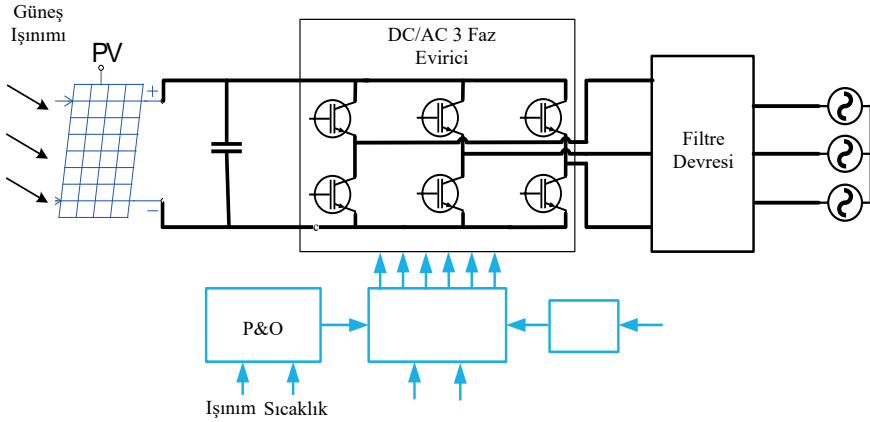
Bu zorlukları aşmak için, uyarlamalı ağ tabanlı bulanık çıkarım sistemi (ANFIS) gibi yapay sinir ağları ve bulanık mantık birleşimi gibi hibrit yöntemler geliştirilmiştir (Guerra, ve ark., 2022; İbrahim ve ark., 2022). Bu sistemler, ANN'nin paralel hesaplama ve öğrenme yeteneklerini, bulanık mantığın çıkarım özellikleriyle birleştirilerek daha etkili bir şekilde kullanabilmektedir.

Diğer yandan, şebekeye bağlı FV eviricilerin şebekeye bağlanmasında en büyük sorunlardan biri eviricilerden kaynaklanan harmoniklerdir. Bu çalışmada, harmonikleri azaltmak ve PWM sinyalleri üretmek için MGNİ tabanlı bir kontrol yöntemi önerilmiştir. Tek aşamalı FV enerji sistemi kullanarak, sistemin toplam maliyetini artıran iki aşamalı sistemler yerine daha ekonomik bir çözüm önerilmiştir (Kumar ve Singh, 2017; Sahoo ve ark., 2018).

Tasarlanan sistemde, bir FV panel sistemi ve MGNİ tabanlı DQ yöntemiyle kontrol edilen üç fazlı bir evirici bulunmaktadır. Evirici için P&O MGNİ algoritması tarafından bir referans akım sinyali üretilmektedir. Elde edilen bu referans akım sinyali, DQ kontrol yöntemiyle anahtarlama sinyallerine dönüştürülür ve 50 kW'lık üç fazlı eviriciden 380V 50Hz AC gerilimi elde etmek mümkün olur. Önerilen DQ kontrol yöntemi, şebeke akımındaki Total Harmonik Distorsiyon (THD) değerini %2.74 seviyesine düşürerek, MGN takibini sürdürürken FV panelden ve eviriciden elde edilen gücü artırmakta ve harmonikleri azaltmaktadır. Güç ve kontrol sistemi MATLAB Simulink üzerinde modellenmiş ve harmonik etkileri simulasyonlar aracılığıyla değerlendirilmiştir.

2. P&O ve DQ Kontrol Yöntemi

Şekil 2.1'de gösterilen sistem modeli, şebekeye bağlı olan 50 kW'lık tek aşamalı üç fazlı bir FV eviricinin yapısını içermektedir.

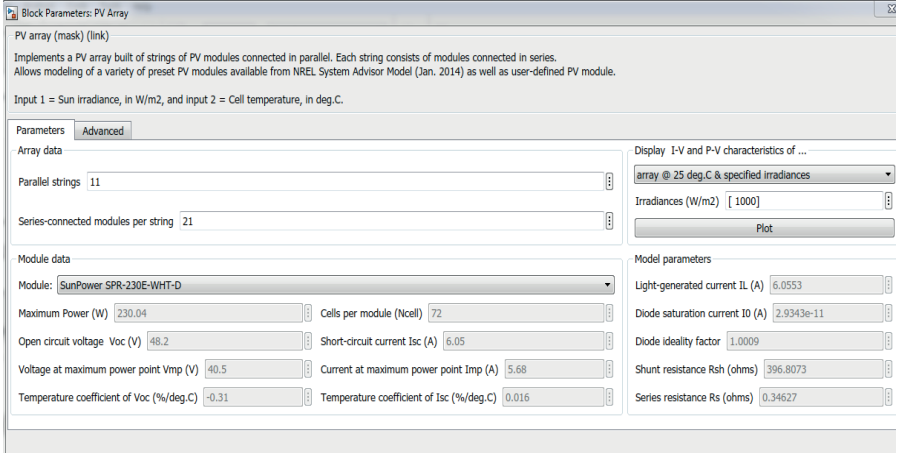


Şekil 2.1. Tek kademeli şebeke bağlantılı üç fazlı FV eviricinin sistem modeli.

Bu sistem modeli, FV panelleri, AC/DC evirici ve filtre devresi bileşenlerini içermektedir. MGNİ algoritmasının çıkışında FV panel sisteminden elde edilen çıkış gerilimi ve akımı kullanılarak panel gücü hesaplanmakta ve P&O algoritması ile referans akım sinyali üretilmektedir. DQ kontrol yöntemi ise DC gücü, referans akım kullanarak bir DC/AC eviricide şebeke gerilimi ile aynı faz ve frekansta AC güce dönüştürür. Devre simülasyonu için Matlab Simulink R2019 kullanılmaktadır.

2.1. FV Güç Sistemi Özellikleri

Şekil 2.2'de, FV modül ekran görüntüsü gösterilmektedir. Seçilen panel parametrelerine dayanarak, istenilen gerilim ve güç seviyelerini elde etmek için paneller seri ve paralel bağlantılarla bir güç sistemi oluşturulmuştur. FV sisteminde panellerin seri bağlanması, sistemin gerilim değerini artırırken, paralel bağlantılar ise sistemin akım değerini yükseltmektedir (Önal ve Türhal, 2022). Bu çalışmada güç sisteminde toplamda 231 adet panel kullanılmış olup, bunların 11'i seri olarak, 21'i ise paralel olarak bağlanmıştır. Elde edilen FV panel sistemi değerleri Tablo 2.1'de gösterilmektedir.

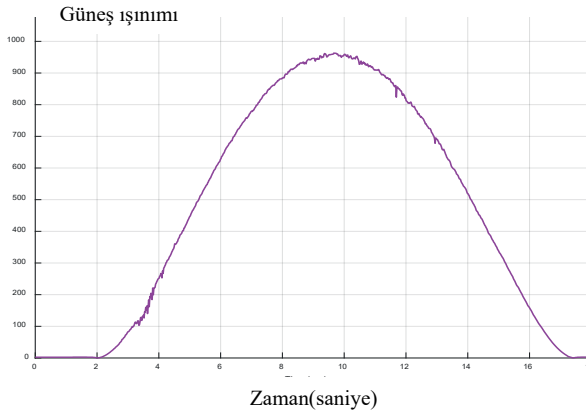


Şekil 2.2. FV modül ekran görüntüsü

Tablo 2.1 FV panel sistemi değerleri

Panel Sayısı	V_{pv} (V)	P_{pv} (kW)	I_{pv} (A)
$21 * 11 = 231$	850	53	62.48

FV sistemdeki akım-gerilim ilişkisinin dinamik değişimini gözlemlemek amacıyla, farklı güneş ışınımı şiddeti değerleri sabit sıcaklık altında uygulanmaktadır. Bu değişen güneş ışınımı şiddeti değerleri, Simulink üzerindeki “builder” bloğu kullanılarak uygulanmaktadır. Şekil 2.3’de, FV modül girişine uygulanan güneş ışınımının değişim eğrisi gösterilmektedir.



Şekil 2.3. FV panel girişine uygulanan güneş ışınımı eğrisi

FV sisteminin Tablo 2.1'de belirtilen değerleri kullanılarak, standart test koşullarında (STC) (1000W/m² güneş ışınımı ve 25°C ortam sıcaklığı) akım-gerilim ve güç-gerilim grafikleri elde edilmiştir. Yapılan simülasyonlar sonucunda simüle edilen FV panel sisteminde MGN'de gözlemlenen gerilim ve akım değerleri sırasıyla 850V ve 62.48A olarak elde edilmiştir.

FV panel eşdeğer devresinde bir akım kaynağı, paralel bir diyot, paralel bir direnç ve seri bir direnç bulunmaktadır. Seri direnç R_s FV panelde gerilim düşümüne neden olan yarı iletkenin direncini temsil etmektedir. Şönt direnç R_{sh} FV paneldeki kaçak direnci göstermektedir. Bir FV panelin akım ve gerilim denklemleri Eşitlik 1, Eşitlik 2, Eşitlik 3, Eşitlik 4 ve Eşitlik 5'te verilmektedir (Nassar ve ark., 2016).

$$I = I_{fv} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V+IR_s}{aV_T} - 1\right) \right] - \frac{V+IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

$$V_T = n (kT)/q \quad (2)$$

$$I_{sc} = I_{fv} - I_0 \left[\exp\left(\frac{I_{sc}R_s/aV_T} - 1\right) \right] - (I_{sc}R_s)/R_{sh} \quad (3)$$

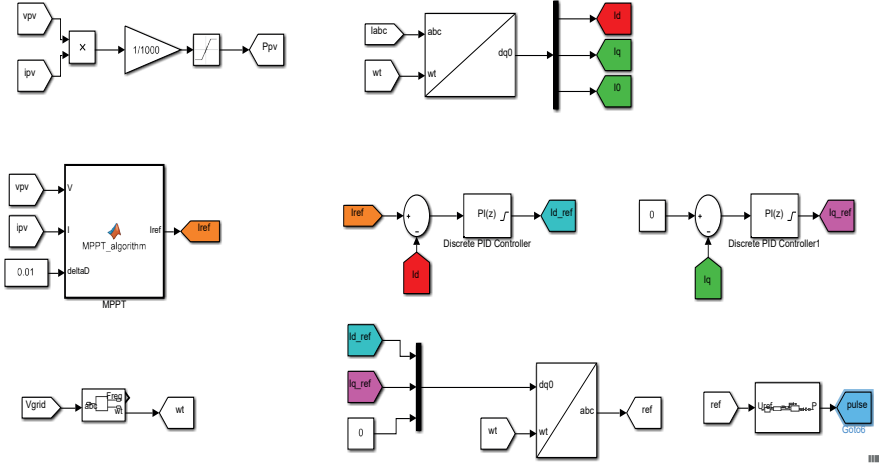
$$I_0 = ((R_{sh} + R_s)I_{sc} - V_{oc}) / (R_{sh} \exp\left(\frac{V_{oc}}{aV_T}\right)) \quad (4)$$

$$I_{fv} = ((R_{sh} + R_s)/R_{sh})I_{sc} \quad (5)$$

Burada I_{fv} foton akımı, I_0 diyot ters doyma akımı, R_s seri direnç, R_{sh} paralel direnç, A ideal diyot faktörü, V_T diyot gerilimi, q elektron yükü, k boltzmann sabiti, n seri bağlı hücre sayısı, T ortam sıcaklığı, I_{sc} kısa devre akımıdır.

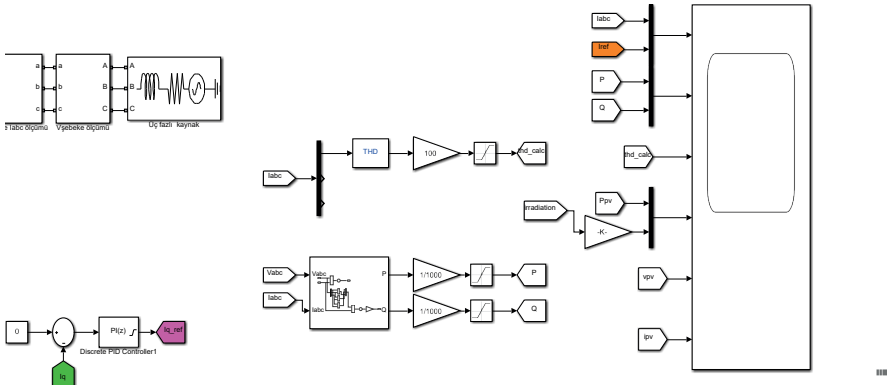
2.2. DQ Kontrol Yöntemi

Şekil 2.4'te, üç fazlı bir şebeke FV eviricideki anahtarların PWM sinyallerini üretmek amacıyla tasarlanmış olan DQ kontrol devresi ve Şekil 2.5'te ölçüm devresi görülmektedir. Bu kontrol devresi, MGNİ bloğu, PLL bloğu, abc/dq dönüşüm bloğu, dq/abc ters dönüşüm bloğu ve PWM bloğundan meydana gelmektedir.



Şekil 2.4. Üç fazlı şebekede bağlantılı fotovoltaik eviricinin DQ akım kontrol devresi

Yapılan çalışmada, literatürdeki diğer MGNİ algoritmalarına kıyasla düşük sistem karmaşıklığı ve yüksek verimlilik sunması sebebiyle P&O MGNİ algoritması tercih edilmiştir. Fotovoltaik panelin STC MGNİ’de çalışabilmesi için optimal yük noktasını bulmak, bu noktada çalıştırmak ve üç fazlı FV eviricideki aktif anahtarları uygun açıda tetiklemek gerekmektedir. FV sistem çıkışındaki akım ve gerilim değerleri ölçülmekte ve bu değerler MGNİ bloğuna giriş olarak aktarılmaktadır. DQ akım kontrolü için referans akım sinyali, MGNİ bloğunun çıkışından elde edilmektedir.



Şekil 2.5. Fotovoltaik eviricinin ölçüm devresi

Üç fazlı AC eviricinin kontrolü, sabit $\alpha\beta$ referans çerçevesi veya dönen dq referans çerçevesi içinde yapılabilmektedir (Wen ve ark., 2014). Bu

çalışmada, eviricinin kontrolü dq referans çerçevesinde gerçekleştirilmiştir. abc referans çerçevesinden dq referans çerçevesine dönüşüm, dq çerçevesinin temel frekansta etkin bir şekilde döndürülmesiyle sağlanabilir. Temel frekans üzerindeki sinüsoidal sinyaller için, dönen çerçevede elde edilen d ve q vektörleri sabit kalır. AC şebekesinin akım bileşenleri, doğrusal dönüşüm ile dq dönüşümü arasındaki ilişkiyi ifade eder ve bu akımların ilişkisi Eşitlik 6'da sunulmaktadır (He and Zhang, 2018).

$$I_{dq0} = \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin(\theta) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (6)$$

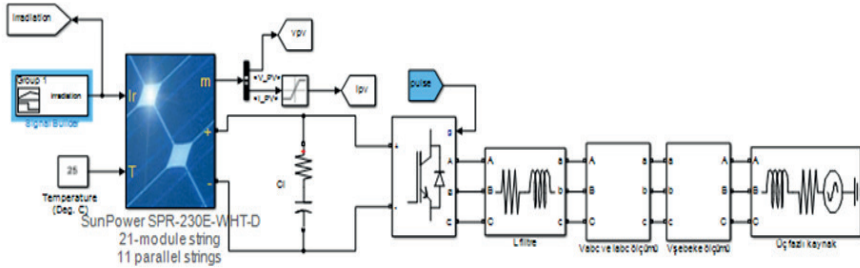
İlk olarak, V_{abc} bileşenlerinden elde edilen θ açısı PLL bloğu kullanılarak tespit edilir. Bu sayede, PLL bloğunun çıkışında, şebeke gerilimiyle aynı fazda olan yeni bir sinüzoidal birim sinyal üretilir. I_{dq0} bileşenleri, ölçülen üç fazlı I_{abc} akımları kullanılarak elde edilir ve dq/abc dönüşümü gerçekleştirilir. MGNI bloğunun çıkışında elde edilen referans akım, ölçülen akımın d bileşeni I_d ile karşılaştırılır ve PI bloğuna iletilir. PI bloğunun çıkışında akımın d bileşeni hesaplanmaktadır. Benzer şekilde, ölçülen akımın q bileşeni I_q ve 0 sinyali karşılaştırılır, ardından PI bloğuna gönderilir ve çıkışında akımın q bileşeni elde edilir. Iabc bileşenleri, ölçülen üç fazlı I_{dq0} akımlarıyla elde edilmiş ve abc/dq0 dönüşümü gerçekleştirilmiştir. Elde edilen I_{abc} akım sinyalleri ile testere dişi sinyali karşılaştırılarak, üç fazlı şebeke üstü FV eviricinin PWM sinyalleri üretilmektedir.

3. Simülasyon Sonuçları

FV panel sisteminin şebeke üzerindeki etkilerini sabit sıcaklık ve değişen güneş ışınımı şiddeti koşullarında belirlemek için, Şekil 3.1'de gösterilen FV panel sistemi, güç ve kontrol devresi Matlab Simulink kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sistem parametreleri Tablo 3.1'de verilmektedir.

Table 3.1. Şebeke bağlantılı üç fazlı FV evirici parametreleri

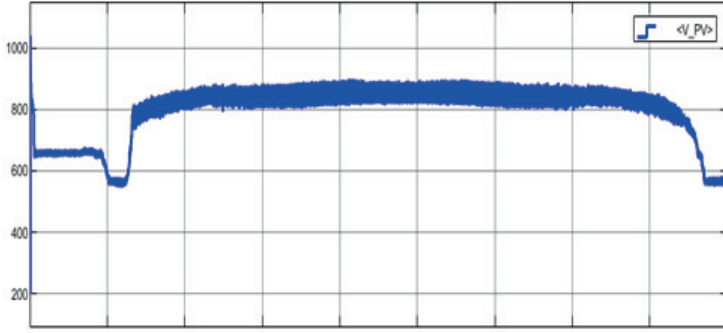
Parametre	Sembol	Değer
Şebeke gerilimi rms	V_g	380 V
Şebeke frekansı	f_g	50Hz
Nominal güç	P	50kW
DC kondansatörü	C_{dc}	100 μ F
FV Panel gücü, gerilimi	P_{mpp} V_{mpp}	230W 48V
Evirici anahtarlama frekansı	f_{ievi}	20 kHz
Filtre bobini	$R_{Lf}L_f$	0.1532 Ω 6.1 mH



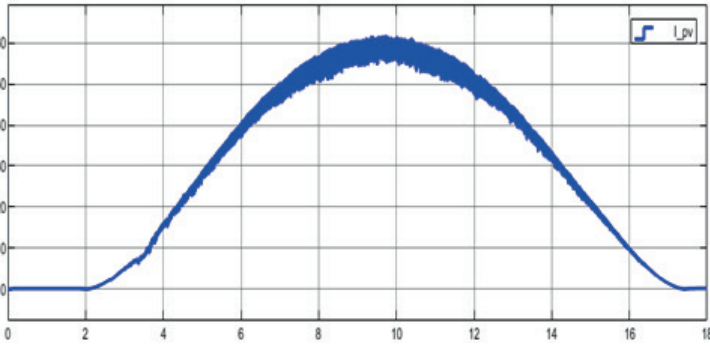
Şekil 3.1. FV panel sistemi ve üç fazlı eviricinin güç ve kontrol devresi

Önerilen DQ akım kontrol yönteminin evirici üzerindeki etkisi, Şekil 2.3'de verilen değişken güneş ışınımı altında güç, verimlilik ve harmonik bozulmalar açısından değerlendirilmek amacıyla test edilmiştir. Simülasyon sonucunda FV panel çıkışından elde edilen akım ve gerilim sinyallerinin şekilleri sırasıyla Şekil 3.2'de gösterilmiştir. FV panelden elde edilen akım farklı güneş ışınım şiddeti değerlerine bağlı olarak 60A'e kadar yükselirken, FV panel gerilimi sabit kalmaktadır.

Panelden elde edilen çıkış FV gücü ve FV maksimum gücü sinyallerinin şekilleri sırasıyla Şekil 3.3'de gösterilmiştir. FV çıkış gücü farklı güneş ışınımı değerlerine bağlı olarak değişmektedir. Maksimum güç noktasında panelden elde edilen maksimum güç FV gücünü takip etmektedir.

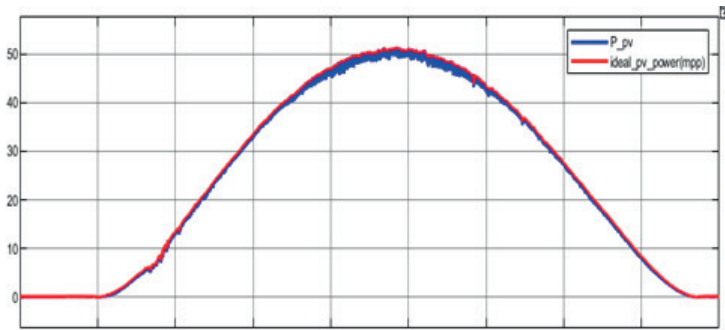


(a)



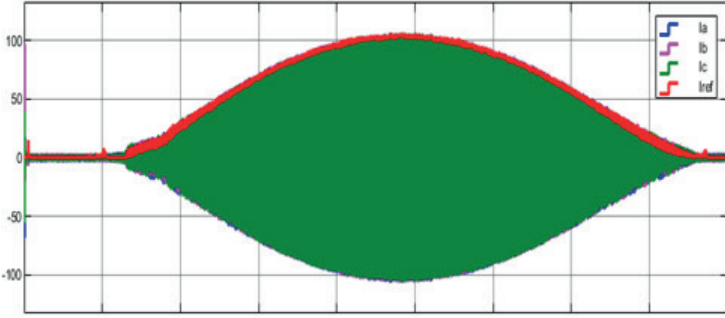
(b)

Şekil 3.2. FV panel çıkışından elde edilen a) akım b) gerilim sinyal şekilleri

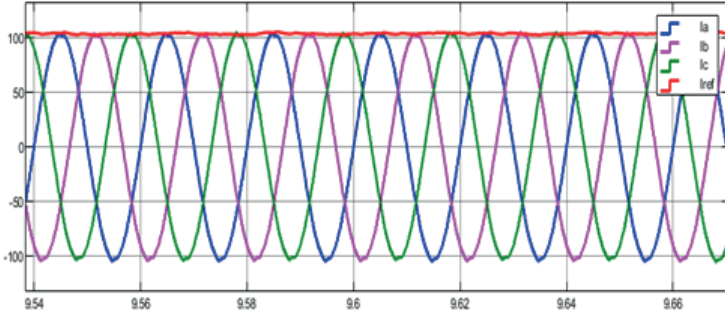


Şekil 3.3. PV panel çıkışından elde edilen PV çıkış gücü ve ideal maksimum güç dalga şekilleri

Şekil 3.4’de üç fazlı evirici çıkışında elde edilen abc şebeke akımları, referans akım sinyali ve faz akımlarının büyütülmüş görüntüsü gösterilmektedir. Evirici faz akımları sinüsoidal formda ve aralarında 120 derece açı farkı olacak şekilde elde edilmiş ve evirici faz akımlarının tepe değerleri DQ akım kontrol yöntemi ile referans akıma başarılı bir şekilde sabitlenmiştir. P&O algoritması Şekil 2.3’te verilen güneş ışınım eğrisine bağlı olarak referans akım değerini değiştirdiğinden üç fazlı eviriciden elde edilen çıkış akımları da değişmektedir.



(a)

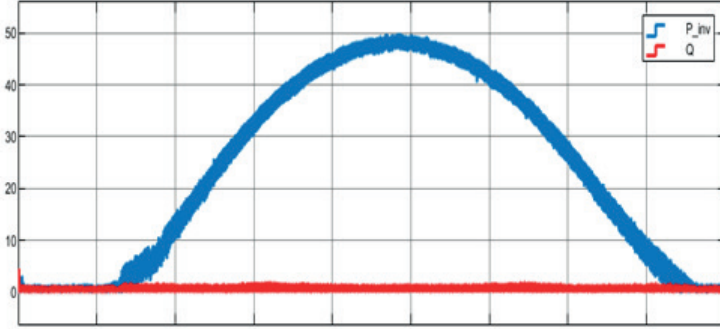


(b)

Şekil 3.4. a) Üç fazlı evirici şebeke akımları dalga şekilleri, b) Büyütülmüş evirici şebeke akımları dalga şekilleri

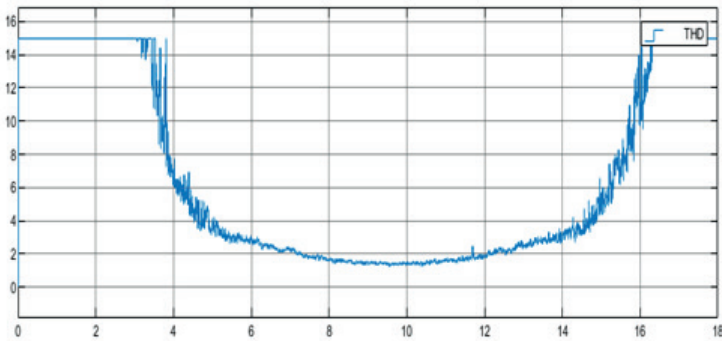
Önerilen DQ tabanlı kontrol algoritmasının genel verimliliğini test etmek için evirici tarafından şebekeye iletilen aktif ve reaktif güç sinyalleri ölçülmektedir. Eviriciden elde edilen aktif ve reaktif güç dalga şekilleri Şekil 3.5’de gösterilmektedir. Üretilen aktif güç FV panelin farklı ışınım değerine

bağlı olarak değişmekte ve reaktif güç sıfır olmaktadır. FV sistemden elde edilen maksimum noktadaki gücü, FV güç eğrisi ile hemen hemen aynıdır.

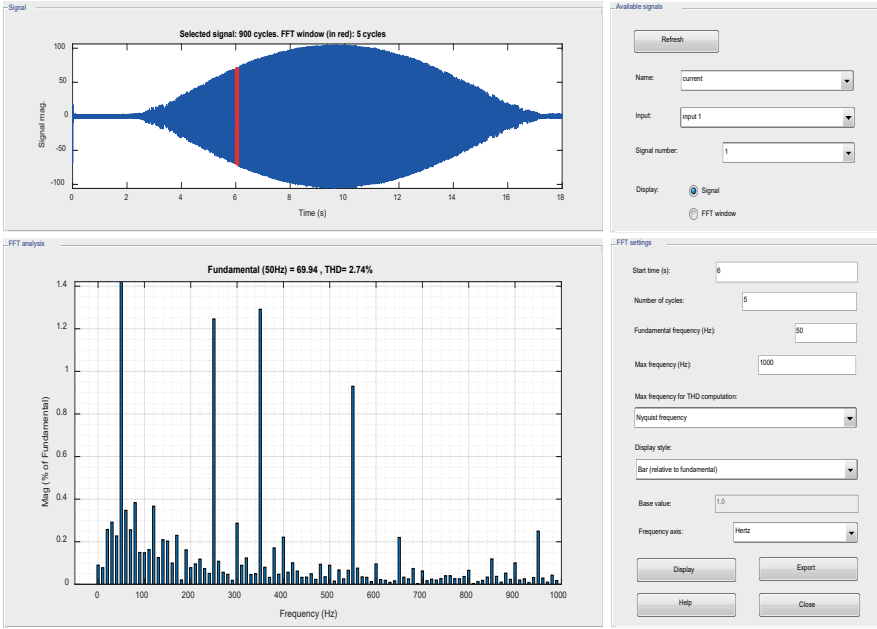


Şekil 3.5. Üç fazlı FV evirici çıkışında elde edilen aktif ve reaktif güç dalga şekilleri

Şekil 3.6'da üç fazlı evirici şebekeye bağlandığında şebekeye aktarılan abc faz akımlarının THD faktörü sinyal şekli ve FFT analizi gösterilmektedir. 10kW'tan büyük güç değerleri için THD faktörünün %6'nın altında olduğu ve THD değerinin standartlarda belirtilen sınırın altında elde edildiği görülmektedir (IEEE, 2014). Ayrıca faz akımında meydana gelen harmoniklerin değerleri matlab simulink'teki FFT bloğu kullanılarak ölçülmüştür. Faz akımındaki THD değeri 6ms'de %2.74 olarak elde edilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 3.6. a) Üç fazlı evirici elde edilen akımların THD dalga şekli b) FFT analizi

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, üç fazlı fotovoltaik evirici sisteminden maksimum güç elde edebilmek, elde edilen gerilim ve akımdaki bozulmaları azaltabilmek ve FV sistemden elde edilen gücü AC şebekeye aktarabilmek için akım kontrol yöntemi önerilmiştir. Bu yöntem P&O maksimum güç izleme noktası izleme algoritması ve DQ kontrol algoritmasını içermektedir. Önerilen kontrol yöntemi, değişken güneş ışınımı altında maksimum güç noktasını izleyebilme yeteneğine sahiptir ve elde edilen güç, bağlı olduğu şebekeye aktarılmaktadır. P&O, evirici için bir referans akım üretirken, DQ algoritması bu referans akımı kullanarak anahtarlarma sinyallerini üretmektedir. Bu yöntem 50 kW'lık üç fazlı bir FV evirici çıkışından 380V 50Hz AC gerilim elde edilmesini sağlamıştır. Fotovoltaik evirici sisteminin çeşitli güneş ışınımı seviyelerindeki performansı Matlab/Simulink platformunda incelenmiş ve sistemin analizi yapılmıştır. Önerilen DQ akım kontrol yönteminin sonuçları incelendiğinde, şebeke akımındaki THD değeri %2.74 olarak ölçülmüş ve bu değer belirlenen sınır değeri olan %5'in altında olduğu görülmüştür. Önerilen DQ kontrol yöntemi, MGN takibini gerçekleştirirken FV panelinden ve eviriciden elde edilen gücü artırarak maksimum verim sağlamak ve şebeke akımında oluşan harmonikleri azaltmaktadır.

5. Kaynaklar

- Ahmad, R., Murtaza, A. F., & Sher, H. A. (2019). Power tracking techniques for efficient operation of photovoltaic array in solar applications—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 101, 82-102.
- AKÇAY, M. T. (2020). 1500 V DC Beslemeli Raylı Sistemlerde Solar Hücre Sisteminin Modellenmesi ve Fizibilitesi. *Haliç Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 3(1), 19-34.
- Ali, M. N., Mahmoud, K., Lehtonen, M., & Darwish, M. M. (2021). Promising MPPT methods combining metaheuristic, fuzzy-logic and ANN techniques for grid-connected photovoltaic. *Sensors*, 21(4), 1244.
- Al-Shahri, O. A., Ismail, F. B., Hannan, M. A., Lipu, M. H., Al-Shetwi, A. Q., Begum, R. A., & Soujeri, E. (2021). Solar photovoltaic energy optimization methods, challenges and issues: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, 284, 125465.
- Bendib, B., Belmili, H., & Krim, F. (2015). A survey of the most used MPPT methods: Conventional and advanced algorithms applied for photovoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 637-648.
- Boghdady, T. A., & Mohamed, Y. A. (2023). Reactive power compensation using STATCOM in a PV grid connected system with a modified MPPT method. *Ain Shams Engineering Journal*, 14(8), 102060.
- Danandeh, M. A. (2018). Comparative and comprehensive review of maximum power point tracking methods for PV cells. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 2743-2767.
- Daraban, S., Petreus, D., & Morel, C., (2014). A novel MPPT (maximum power point tracking) algorithm based on a modified genetic algorithm specialized on tracking the global maximum power point in photovoltaic systems affected by partial shading, *Energy*, 74, 374-388.
- Guerra, M. I., de Araújo, F. M., de Carvalho Neto, J. T., & Vieira, R. G. (2022). Survey on adaptative neural fuzzy inference system (ANFIS) architecture applied to photovoltaic systems. *Energy Systems*, 1-37.
- He, J., & Zhang, X. (2018). Comparison of the back-stepping and PID control of the three-phase inverter with fully consideration of implementation cost and performance. *Chinese Journal of Electrical Engineering*, 4(2), 82-89.
- Ibrahim, S. A., Nasr, A., & Enany, M. A. (2021). Maximum power point tracking using ANFIS for a reconfigurable PV-based battery charger under non-uniform operating conditions. *IEEE Access*, 9, 114457-114467.
- Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2014). IEEE recommended practice and requirements for harmonic control in electric power systems. *IEEE Std 519*, June 11 2014, pp.1-29.

- Kumar, R., & Singh, B. (2017). Single stage solar PV fed brushless DC motor driven water pump. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 5(3), 1377-1385.
- Kjaer, S. B. (2012). Evaluation of the “hill climbing” and the “incremental conductance” maximum power point trackers for photovoltaic power systems. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 27(4), 922-929.
- Nassar-Eddine, I., Obbadi, A., Errami, Y., & Agunaou, M. (2016). Parameter estimation of photovoltaic modules using iterative method and the Lambert W function: A comparative study. *Energy Conversion and Management*, 119, 37-48.
- Ostergaard, P. A., Duic, N., Noorollahi, Y., & Kalogirou, S. (2022). Renewable energy for sustainable development. *Renewable Energy*, 199, 1145-1152.
- Önal, Y., & Turhal, Ü. Ç. (2022) Development of an Anfis based Control Algorithm for Maximum Power Point Tracking in on-Grid Double Stage Single Phase PV Inverter. *Journal of Scientific Reports-A*, 050, 150-168.
- Podder, A. K., Roy, N. K., & Pota, H. R. (2019). MPPT methods for solar PV systems: a critical review based on tracking nature. *IET Renewable Power Generation*, 13(10), 1615-1632.
- Radjai, T., Rahmani, L., Gaubert, P. & Gassab, S. (2014). Fuzzy Logic Variable Step of P&O MPPT with Direct Control Method Using Cuk Converter, *ELECTRIMACS*, 324-329.
- Rezk, H., Fathy, A., & Abdelaziz, A. Y. (2017). A comparison of different global MPPT techniques based on meta-heuristic algorithms for photovoltaic system subjected to partial shading conditions. *Renew. Sust. Energy Rev.*, 74, 377-386.
- Sabo, A., Kolapo, B. Y., Odoh, T. E., Dyari, M., Abdul Wahab, N. I., & Veerasamy, V. (2022). Solar, Wind and Their Hybridization Integration for Multi-Machine Power System Oscillation Controllers Optimization: A Review. *Energies*, 16(1), 24.
- Sahoo, S. K., Sukchai, S., & Yanine, F. F. (2018). Review and comparative study of single-stage inverters for a PV system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91, 962-986.
- Saravanan, S., & Babu, N. R. (2016). Maximum power point tracking algorithms for photovoltaic system—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 192-204.
- Zafar, M. H., Khan, N. M., Mirza, A. F., Mansoor, M., Akhtar, N., Qadir, M. U., & Moosavi, S. K. R. (2021). A novel meta-heuristic optimization algorithm based MPPT control technique for PV systems under complex partial shading condition. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 47, 101367.

- Zhang, Y., Ma, T., & Yang, H. (2022). Grid-connected photovoltaic battery systems: A comprehensive review and perspectives. *Applied Energy*, 328, 120182.
- Wen, B., Boroyevich, D., Burgos, R., Mattavelli, P., & Shen, Z. (2014). Small-signal stability analysis of three-phase AC systems in the presence of constant power loads based on measured dq frame impedances. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 30(10), 5952-5963.