



DSP based hybrid control method for PV systems

Hasan Üzmuş^{1*}, Naci Genç², Mehmet Ali Çelik³

¹Electrical-Electronics Engineering Department, Engineering Faculty, Van Yuzuncu Yil University, 65040, Tuşba Van, Türkiye

²Electrical-Electronics Engineering Department, Engineering Faculty, Yalova University, 77200, Yalova, Türkiye

³Electrical and Energy Department, Ağrı Vocational School, Ağrı Ibrahim Cecen University, 04000, Ağrı, Türkiye

Highlights:

- The control of DC/DC boost converter with the proposed hybrid control method via DSP
- Current and voltage control for PV system at maximum power point.
- Faster control method without oscillation and chattering.

Keywords:

- Photovoltaic panel
- DC/DC converter
- MPPT
- Hybrid control
- DSP

Article Info:

Research Article

Received: 25.01.2022

Accepted: 24.10.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.1062711

Correspondence:

Author: Hasan Üzmuş

e-mail:

hasanuzmus@yyu.edu.tr

phone: +90 506 063 3274

Graphical/Tabular Abstract

In this study, a DC/DC boost converter that supplied with PV panels as input source was simulated for a 400 W load with MPPT-PI and the proposed hybrid control approaches in MATLAB/Simulink environment and the results were compared. An experimental setup was established for the system controlled with the proposed hybrid control method thanks to digital signal processor (DSP) TMS320F28379D board. The experimental and simulation results were compared.

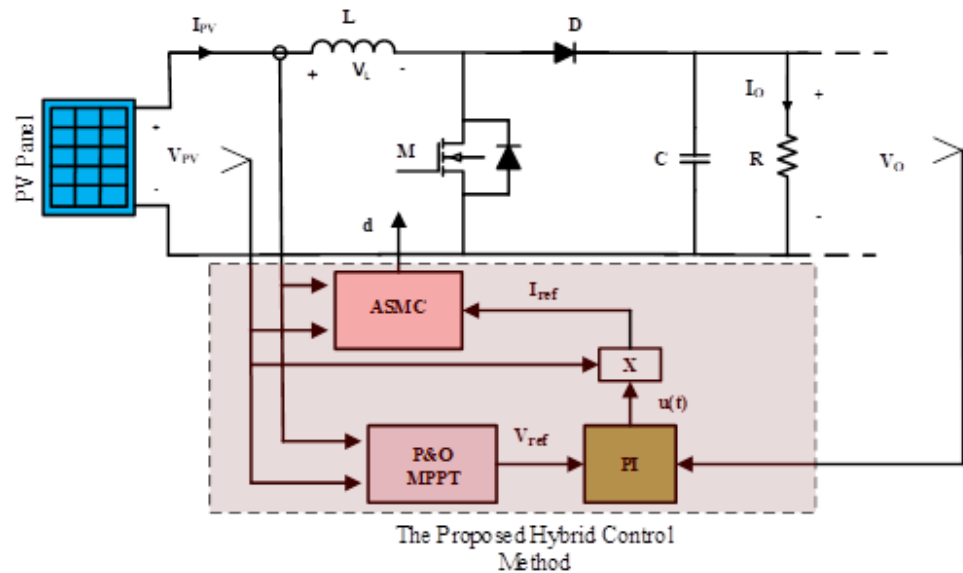


Figure A. The system with proposed hybrid control method

Purpose: In this study, it is aimed to control the output voltage and current of the DC/DC boost converter faster with PI and ASM controllers, respectively, while PV panels are forced to harvest maximum power with the P&O MPPT control method.

Theory and Methods: In this study, perturb and observation maximum power point tracking (P&O MPPT) control method was used to harvest maximum power from solar energy with PV panel. Conventional PI and average sliding mode (ASM) controllers were utilized for voltage and current control, respectively. The proposed hybrid control method was obtained by cascading P&O MPPT, PI, ASM controllers. MPPT and conventional PI controllers were cascaded in order to obtain an output voltage that does not change according to irradiation and load. A reference voltage was generated with MPPT for PI controller to control the output voltage. The reference current for ASMC was generated by cascaded MPPT-PI controllers. ASM controller was utilized for increasing the speed of the controller and controlling current. The process was depicted in Figure A.

Results: The simulation and experimental results were compatible. There was no oscillation and chattering at output of the system. The proposed hybrid control method is quite fast.

Conclusion: The simulation and experimental results clearly indicate that the proposed hybrid control method is quite satisfactory. This hybrid control method can be used for on-grid, off-grid and hybrid PV systems.



FV sistemler için DSP tabanlı hibrit kontrol yöntemi

Hasan Üzmuş^{1*}, Naci Genç², Mehmet Ali Çelik³

¹Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 65040, Tuşba, Van, Türkiye

²Yalova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 77200, Yalova, Türkiye

³Ağrı İbrahim Çeçen Üniversitesi, Ağrı Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, 04000, Ağrı, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Önerilen hibrit kontrol yöntemi ile DA/DA yükselten tip dönüştürücünün DSP vasıtasıyla kontrolü
- Maksimum güç noktasındaki FV sistem için akım ve gerilim kontrolü
- Salınım ve çarptırılmadan daha hızlı kontrol yöntemi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 25.01.2022

Kabul: 24.10.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.1062711

Anahtar Kelimeler:

Fotovoltaik panel,
DA/DA dönüştürücü,
MGNİ,
hibrit kontrol,
DSP

ÖZ

Güneşten gelen ışınları elektrik enerjisine dönüştüren fotovoltaik (FV) paneller çıkışlarında doğrusal olmayan düşük seviyeli doğru akım (DA) formunda gerilim üretirler. Bu çalışmada, yüksek güçlü uygulamalar için FV panellerin gerilimini regüle etmek amacıyla yükselten tip DA/DA dönüştürücü devresine DSP tabanlı hibrit kontrol yöntemi önerilmiştir. Önerilen bu kontrol yöntemi aynı zamanda değiştir ve gözle maksimum güç noktası izleme (D&G MGNİ) işlevini de içermektedir. Gerilim kontrolü için PI ve akım kontrolü için ortalama kayan kipli (OKK) kontrolcü kullanılmıştır. Önerilen hibrit kontrol yöntemi, D&G MGNİ, PI, OKK kontrolcülerinin arka arkaya seri bağlanmasıyla elde edilmiştir. Önerilen kontrol yöntemi ile FV panel maksimum güç noktasında çalıştırılırken, çıkış gerilimi ve akımı sırasıyla PI ve OKK kontrolcülere ile kontrol edilmiştir. DA/DA yükselten dönüştürücünün giriş kaynağı FV panel olarak modellenmiş ve MATLAB/Simulink benzetim ortamında önerilen hibrit kontrol yöntemi ile kontrol edilmiştir. Önerilen sistem ve kontrolcü için deney düzeneği kurulmuş ve DSP TMS320F28379D kartı vasıtasıyla çıkış gerilimi 200V ve çıkış gücü 400W olan sistemin deneysel sonuçları aktarılmıştır.

DSP based hybrid control method for PV systems

H I G H L I G H T S

- The control of DC/DC boost converter with the proposed hybrid control method via DSP
- Current and voltage control for PV system at maximum power point
- Faster control method without oscillation and chattering

Article Info

Research Article

Received: 25.01.2022

Accepted: 24.10.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.1062711

Keywords:

PV panel,
DC/DC converter,
MPPT,
Hybrid control,
DSP

ABSTRACT

Photovoltaic (PV) panels, which convert solar energy into electrical energy, generate non-linear, low-level direct current (DC) voltage. In this study, a DSP-based hybrid control method was proposed for the DC/DC boost converter to regulate the voltage of PV panels for high power applications. This proposed control method also includes perturb and observation maximum power point tracking (P&O MPPT) method. The output voltage was controlled with PI controller, and the current with average sliding mode (ASM) controller. The proposed hybrid control method was obtained by cascading P&O MPPT, PI, ASM controllers. With the proposed hybrid control method, while the PV panel was operated at the maximum power point, the output voltage and current were controlled by PI and ASM controllers, respectively. The input source of the DC/DC boost converter was modeled as FV panel and controlled with the proposed hybrid control method in the MATLAB/Simulink environment. The experimental setup was established for the proposed system and controller, and the experimental results of the system with 200V output voltage and 400W output power by DSP TMS320F28379D card were presented.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : *hasanuzmus@yyu.edu.tr, naci.genc@yalova.edu.t, macelik@agri.edu.tr /
Tel: +90 506 063 3274

1. Giriş (Introduction)

Günümüzde artan nüfus ile beraber teknolojik cihazların kullanımı yaygınlaşmasından dolayı elektrik enerjisine olan talep sürekli bir artış göstermektedir ve bu durum dünyada bir enerji krizine neden olmaktadır. Çevre dostu olmayan sınırlı fosil kaynaklı yakıtlar bu enerji krizini aşmada yetersiz kalmaktadır. Bu nedenlerden dolayı fosil kaynaklı yakıtlara alternatif olabilecek çevre dostu, düşük karbonlu ve yenilenebilir (güneş, rüzgâr, hidrojen vb.) enerji kaynakları oldukça cazip hale gelmiştir [1-2]. Özellikle, güneş enerjisi; sürdürülebilir, sınırsız ve çevre dostu olan bir enerji kaynağı olduğu için büyük bir ilgi görmektedir [3]. Gelişen yarı iletken teknolojisi ile her geçen gün verimi artırılan fotovoltaik (FV) paneller sayesinde güneşten gelen ışınlar (enerji) elektrik enerjisine dönüştürülmektedir [4]. FV paneller, güneşin doğal hareketi ve mevsimsel koşullar nedeniyle sürekli değişen ışınların sadece %16-21'ini elektrik enerjisine dönüştürebilmektedir [5]. FV panel ile elektrik enerji üretimi çok caziptir çünkü FV panelin hareketli herhangi bir parçası yoktur bu yüzden bakım maliyeti oldukça düşüktür ve girdi olarak kullanılan çevre dostu güneş enerjisi ise her yerdedir ve maliyetsizdir [6]. FV panellerin kullanıldığı sistemler, tarımsal faaliyetlerde, konutlarda, sanayide ve askeriyede oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır [7]

FV panel ile güneş enerjisinden elde edilen DA elektrik enerjisi doğrusal değildir. FV panelin akımı ve gerilimi sırasıyla üzerine düşen ışınlarla ve ortam sıcaklığına göre değişmektedir. FV panel üzerine düşen ışınlardan her zaman ve her koşulda maksimum güç elde edilmesi amaçlanmaktadır. Maksimum güç, PV paneli maksimum güç noktasında (MGN) [8-9] çalıştırılmasıyla elde edilebilmektedir. FV panelin MGN'na ulaşması ve değişken MGN'ni takip edebilmesi için geliştirilmiş Artımlı İletkenlik, Bulanık Mantık, Değiştir ve gözle (D&G), Yapay Sinir Ağı vb. gibi birçok maksimum güç noktası izleme (MGNİ) yöntemi mevcuttur [10]. Hem FV panelde MGN'ni izlemek hem de yüke aktarılan gücü kontrol etmek için yük ile PV paneli arasında DA/DA dönüştürücüler gibi ara devreler gereklidir [11]. PV panelinin çıkış gerilimi sınırlıdır ve doğrusal değildir, bu nedenle filtre görevi gören DA/DA yükselten tip dönüştürücüler, yüksek güçlü uygulamalar için çok önemlidir [12]. DA/DA yükselten tip dönüştürücünün gerilim kontrolü, klasik PI kontrolcüsü ile gerçekleştirilebilir. PI kontrolcü, doğrusal ve bazı doğrusal olmayan sistemlerde istenilen sonuçların elde edilebilmesi için yeterli olabilmektedir [13]. PI kontrolcü ile istenilen çıkış geriliminin elde edilmesi için iyi ayarlanmış kontrolcü katsayıları gereklidir. Genel olarak, kontrolcü katsayıları Ziegler-Nichols (ZN) yöntemi ile düzenlenir [14].

Kayan kipli kontrol (KKK) yöntemi, doğrusal olmayan kontrolcüler arasında kararlılığı, sağlamlığı ve iyi düzenlenebilmesi ile öne çıkmaktadır [15]. Ancak KKK yönteminin sahip olduğu karmaşık yapısı parametrelerinin belirlenmesini oldukça zorlaştırmaktadır. Ayrıca KKK yönteminde anahtarlama frekansı değişkendir ve bu onu dış bozulculara ve gürültüye karşı çok hassas yapmasını yanında çıkış değerlerinde istenilmeyen çatırtılara (chattering) neden olmaktadır [16]. KKK yönteminin dezavantajlarını ortadan kaldırmak için, harici bozulcuların etkilerini göz ardı edebilen sabit bir anahtarlama frekansına sahip bir yöntem gereklidir. Sabit anahtarlama frekansı için ortalama kayan kipli (OKK) kontrol yöntemi kullanılır. Bu yöntemde, değişken kontrol sinyali ile görev döngüsünün nasıl değiştiğini önemsemeyen sabit bir anahtarlama sinyali elde etmek için rampa sinyalinin frekansı sabitletir. Böylece sabit anahtarlama frekansı için ek ekipman kullanımı ortadan kalkmış olur.

Bu makalede, FV panel ile güneş enerjisinden maksimum güç elde etmek için D&G MGNİ kontrol yöntemi kullanılmıştır. Gerilim ve

akım kontrolü için sırasıyla klasik PI ve OKK kontrolcülerini kullanılmıştır. DA/DA yükselten tip dönüştürücü çıkışında ışımaya ve yüke göre değişmeyen bir gerilim elde edebilmek için MGNİ ve klasik PI kontrolcülerini arka arkaya seri olarak bağlanmıştır. Çıkış geriliminin kontrol eden PI denetleyicisi için MGNİ kontrolcüsü ile bir referans gerilimi üretilmiştir. Ayrıca, aynı devre için kontrolcünün hızının artırılması ve çıkış akımının kontrol edilebilmesi için seri MGNİ-PI kontrolcüsüne OKK kontrolcü seri olarak bağlanmıştır. OKK kontrolcü için referans akımı, çıkış gerilimini kontrol eden seri MPPT-PI kontrolcüsü ile üretilmiştir. Bu çalışmada, giriş kaynağı olarak FV panellerin kullanıldığı DA/DA yükselten tip dönüştürücü MGNİ-PI ve önerilen hibrit kontrol yöntemleri ile kontrolü için benzetim çalışmaları MATLAB/Simulink ortamında yapılmıştır. Elde edilen benzetim sonuçları karşılaştırılmıştır. Önerilen sistem için kurulan deney düzeneğinin önerilen hibrit kontrol yöntemi ile kontrol edilebilmesi için dijital sinyal işlemci (DSP) TMS320F28379D kartı kullanılmıştır. Önerilen sistemin çıkış gerilimi ve gücü sırasıyla 200V ve 400 W olacak şekilde tasarlanmıştır. Benzetim ve deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Bu çalışmanın literatüre en önemli katkısı, FV panellerin D&G MGNİ kontrol yöntemi ile maksimum güç noktasında çalıştığı sırada DA/DA yükselten tip dönüştürücünün çıkış geriliminin ve akımının hızlı bir şekilde kontrol edilebilmesidir.

DA/DA yükselten tip dönüştürücü ve FV panel sırasıyla Bölüm 2 ve 3'te verilmiştir. Kullanılan kontrol yöntemleri ve önerilen hibrit kontrol yöntemi 4. Bölümde anlatılmıştır. Benzetim ve deneysel sonuçlar 5. Bölümde verilmiştir. Son olarak, çalışmadan elde edilen sonuçlar 6. Bölümde aktarılmıştır.

2. Da/Da Yükselten Tip Dönüştürücü (Dc/Dc Boost Converter)

Yükselten tip dönüştürücüler, düşük giriş gerilimini istenilen gerilim değerine yükseltmek için kullanılır [17]. Özellikle güneş enerjisinden üretilen doğrusal olmayan DA formadaki düşük gerilim, FV panel ile yük arasına bağlanan DA/DA yükselten tip dönüştürücü sayesinde filtrelenerek daha yüksek çıkış gerilimlerine dönüştürülür. Şekil 1 a'da verilen DA/DA yükselten tip dönüştürücü için iki çalışma durumu söz konusudur.

I. Durum (Şekil 1b): M anahtarı iletimde ve indüktörde (L) FV akımı (I_{FV}) depolanmaktadır. I. Durum Eş. 1 ve Eş. 2'de verildiği gibi analiz edilir.

$$\frac{dI_{FV}}{dt} = \frac{1}{L}V_{FV}, V_L = dV_{FV} \quad (1)$$

$$\frac{dV_O}{dt} = \frac{1}{C} \left(-\frac{V_O}{R} \right) \quad (2)$$

II. Durum (Şekil 1c): M anahtarı kesimde. İndüktörde depolanan akım ve I_{FV} , yeni bir döngüye kadar yüke (R) doğru akar. II. Durum Eş. 3 ve Eş. 4'te verildiği gibi analiz edilir.

$$\frac{dI_{FV}}{dt} = \frac{1}{L}(V_{FV} - V_O), V_L = (1 - d)(V_{FV} - V_O) \quad (3)$$

$$\frac{dV_O}{dt} = \frac{1}{C} \left(I_L - \frac{V_O}{R} \right) \quad (4)$$

Giriş ve çıkış gerilimleri arasındaki dönüşüm oranı Eş. 5'te verilmiştir. Önerilen dönüştürücünün görev çarpanı d olarak tanımlanmıştır.

$$0 = dV_{FV} + (1 - d)(V_{FV} - V_O), \frac{V_O}{V_{FV}} = \frac{1}{1-d} \quad (5)$$

Tablo 1’de verilen parametrelere sahip DA/DA yükselten dönüştürücü [18]’de verilen bilgilere göre tasarlanmıştır.

Tablo 1. DA/DA yükselten tip dönüştürücünün parametreleri (The parameters of DC/DC boost converter)

Parametreler	Değerler
Giriş gerilimi (V_{FV})	100-120 V
Anahtarlama frekansı (f_s)	50 kHz
Çıkış gerilimi (V_o)	200 V
Çıkış gücü (P_o)	400 W
İndüktör (L)	500 mH
Kapasitör (C)	470 μ F
Anahtarlama elemanı (M)	IRFP460
Diyot (D)	DSEI30-06A

3. Fv Panel (Pv Panel)

FV panel yarı iletken elemanlardan oluşur ve erişimi kolay ve ücretsiz olan güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştürür. FV panelde hareketli parça bulunmadığından bakım maliyetleri düşüktür. Aynı

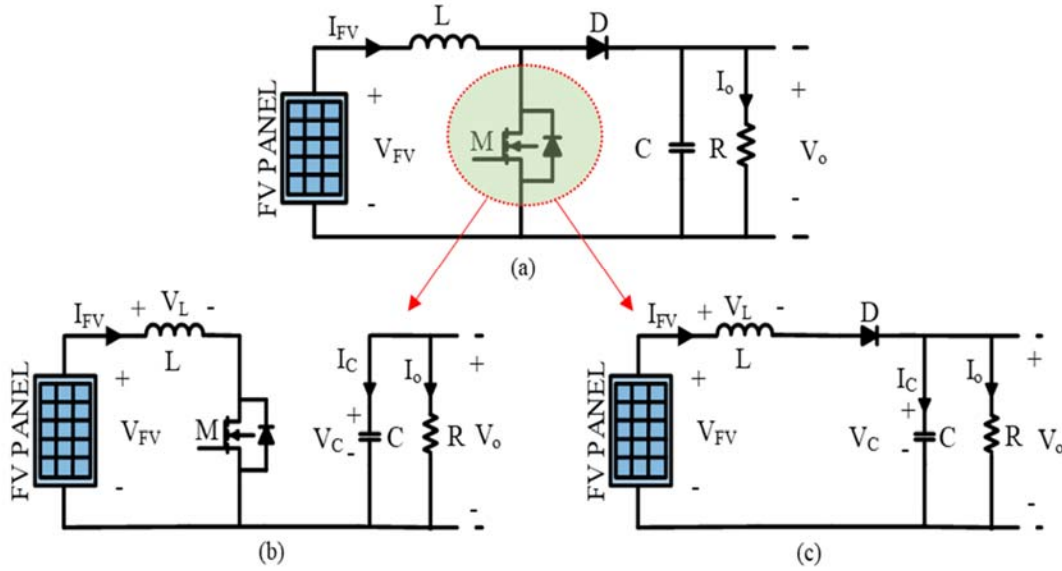
zamanda hem verimleri hem de çıkış gerilimleri düşüktür [19]. FV panel, şebekeye bağlı, şebekeden bağımsız ve hibrit sistemler için kullanılabilir [20]. FV panel (Şekil 2a) birbirine seri ve paralel bağlanan güneş pillerinden oluşmaktadır (Şekil 2b). Tek diyotlu güneş pilinin elektriksel eşdeğer devre modeli Şekil 2c’de verilmiştir.

Tek diyotlu bir güneş pili için elektriksel eşdeğer devre modelinin akımı (I_{FV}), Kirchoff Akım Yasası ile Eş. 6’da verildiği gibi hesaplanmaktadır. Paralel koldaki diyot akımı (I_D), diğer paralel koldaki akım (I_{sh}) ve foto akımı (I_{ph}) sırasıyla Eş. 8, Eş. 9 ve Eş. 10’da verilen denklemlerle hesaplanmıştır. R_s : Seri direnç, R_{sh} : Paralel direnç, V_{FV} : Güneş pilinin gerilimi, I_s : Diyot için ters doyma akımı olarak verilmiştir.

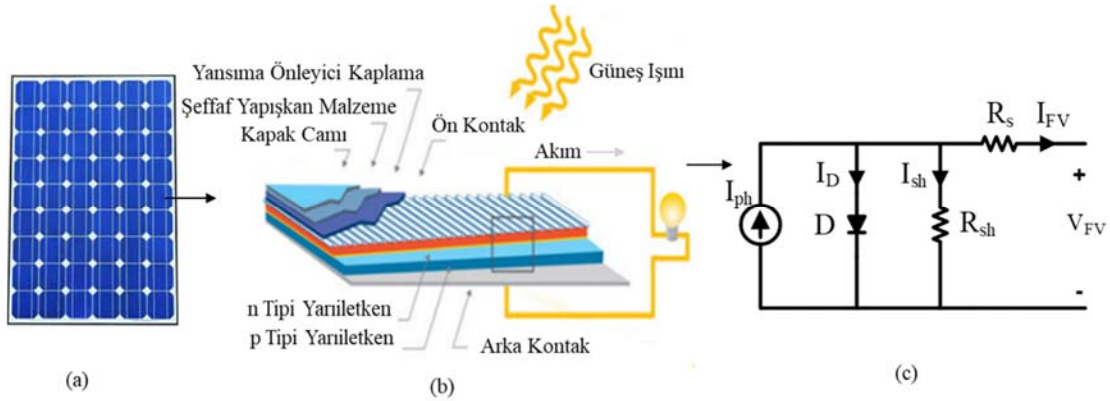
$$I_{FV} = I_{ph} - I_D - I_{sh} \quad (6)$$

$$I_{FV} = I_{ph} - I_D \quad (7)$$

$$I_D = I_s \left[e^{\frac{V_{FV} + I_{FV} R_s}{A N_s V_T}} - 1 \right] \quad (8)$$



Şekil 1. a) DA/DA yükselten tip dönüştürücü, b) I. Durum ve c) II. Durum (a) DC/DC boost converter, b) Mode I and c) Mode II)



Şekil 2. a) FV panel, b) güneş pili ve c) güneş pilinin elektriksel eşdeğer devresi (a) PV panel, b) solar cell and c) the equivalent electrical model of solar cell)

$$I_{sh} = \frac{V_{FV} + I_{FV} R_s}{R_{sh}} \quad (9)$$

$$I_{ph} = G(I_{sc} + \alpha_{I_{sc}} \cdot \Delta T) \quad (10)$$

G: Birim başına ışınım (pu) (G/G_{ref}), $G_{ref} = 1000(W/m^2)$, ΔT = Sıcaklık değişimi (K), I_{sc} : Standart test koşulları için kısa devre akımı (A), $\alpha_{I_{sc}}$: I_{sc} için sıcaklık katsayısı (%0.05 A/K). Termal gerilim (V_T) Eş. 11 ile hesaplanmıştır. Burada T_c : Güneş pilinin çalışma sıcaklığı, k: Boltzman sabiti (1.38×10^{-23} [J/K]) ve q: Elektron sayısı ($1.602 \times 10^{-19}C$) olarak verilmiştir.

$$V_T = \frac{kT_c}{q} \quad (11)$$

I_{FV} Eş. 12’de verilen denklem ile hesaplanmıştır. Burada, N_s : Seri bağlı güneş pili sayısı ve A: İdeal katsayı olarak tanımlanmıştır.

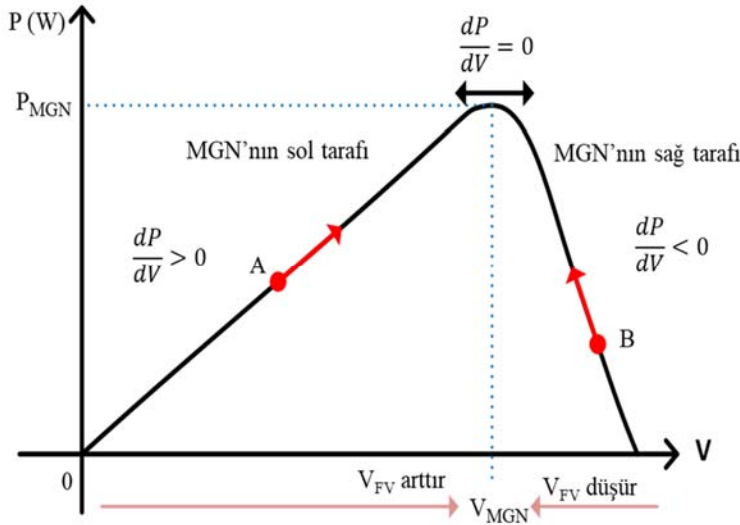
$$I_{FV} = I_{ph} - I_s \left[e^{\frac{V_{FV} + I_{FV} R_s}{A N_s V_T}} - 1 \right] - \frac{V_{FV} + I_{FV} R_s}{R_{sh}} \quad (12)$$

4. Kontrol Yöntemleri (Control Methods)

Önerilen kontrol yöntemi ile FV panel maksimum güç noktasında çalıştırılırken çıkış akımı ve gerilimi kontrol edilmektedir. Önerilen kontrol yöntemi MGNİ, PI ve OKK kontrolcülerinin art arda bağlanmasıyla elde edilmiştir. Bu bölümde kullanılan ve önerilen kontrol yöntemleri anlatılmıştır.

4.1. MGNİ Kontrol Yöntemi (MPPT Control Method)

MGNİ kontrol algoritmaları, gelen güneş ışınlarının maksimum güç noktasını tespit etmek için PV panellerde kullanılırlar. PV paneller, MGNİ kontrol yöntemi ile iklim değişikliklerinden bağımsız olarak mümkün olan en yüksek miktarda enerjiyi üretmeye çalışır [21]. Bu çalışmada, D&G MGNİ yöntemi şebekeye bağlı olmayan bir PV sistemi için maksimum güç noktasına karar vermek için kullanılmıştır. D&G MGNİ kontrol yönteminde P-V eğrisi taranır ve MGN’na ulaşmak için çalışma noktası değiştirilir. Gerilim değişimi, pozitif güç değişimi ile A noktasından MGN’na doğru artar ve negatif güç değişimi ile B noktasından MGN’na doğru azalır. Güç değişimi sıfıra olduğunda ise sistem MGN’ndadır. Sürekli olarak tekrar edilen bu süreç Şekil 3’te verilmiştir [22, 23].



Şekil 3. D&G MGNİ kontrol yöntemi (P&O MPPT control method)

Referans görev çarpanına göre değişen “d” ye sahip olan D&G MGNİ yöntemi ile kontrol edilen DA/DA yükselten tip dönüştürücünün çıkış gerilimi, güneşten gelen ışınların yoğunluğuna ve yüke göre değişmektedir. Bu yöntemle çıkışta sabit bir gerilim elde edebilmek için sistemin belirlenmiş ışın yoğunluğu ve yükte çalıştırılması gerekmektedir. Ancak giriş ve çıkış güçleri değişse bile sistemin çıkışında sabit bir gerilim değerinin elde edilmesi gerekmektedir. Böylece D&G MGNİ algoritması ile gerilim kontrolü için kullanılan PI kontrolör için bir referans gerilim üretilmiş ve böylece yüke ve ışınların yoğunluğuna ve miktarına göre değişmeyen sabit bir çıkış gerilimi elde edilmiştir. Şekil 4’te D&G MGNİ kontrol yönteminin akış diyagramı verilmiştir. Bu akış diyagramı, Şekil 3’te verilen D&G MGNİ kontrol yönteminin çalışma prensibine göre oluşturulmuştur.

4.2. PI Kontrol (PI Control)

Karmaşık kontrol yöntemlerinin temelini oluşturan PI kontrol yöntemi, basitliği ve kolay uygulanabilirliği nedeniyle endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır [24]. PI denetleyici oransal (K_p) ve integral (K_i) kazançları ZN yöntemi kullanılarak belirlendi [11]. PI kontrol yöntemi Eş. 13’te verilen denklem işlem yapmaktadır.

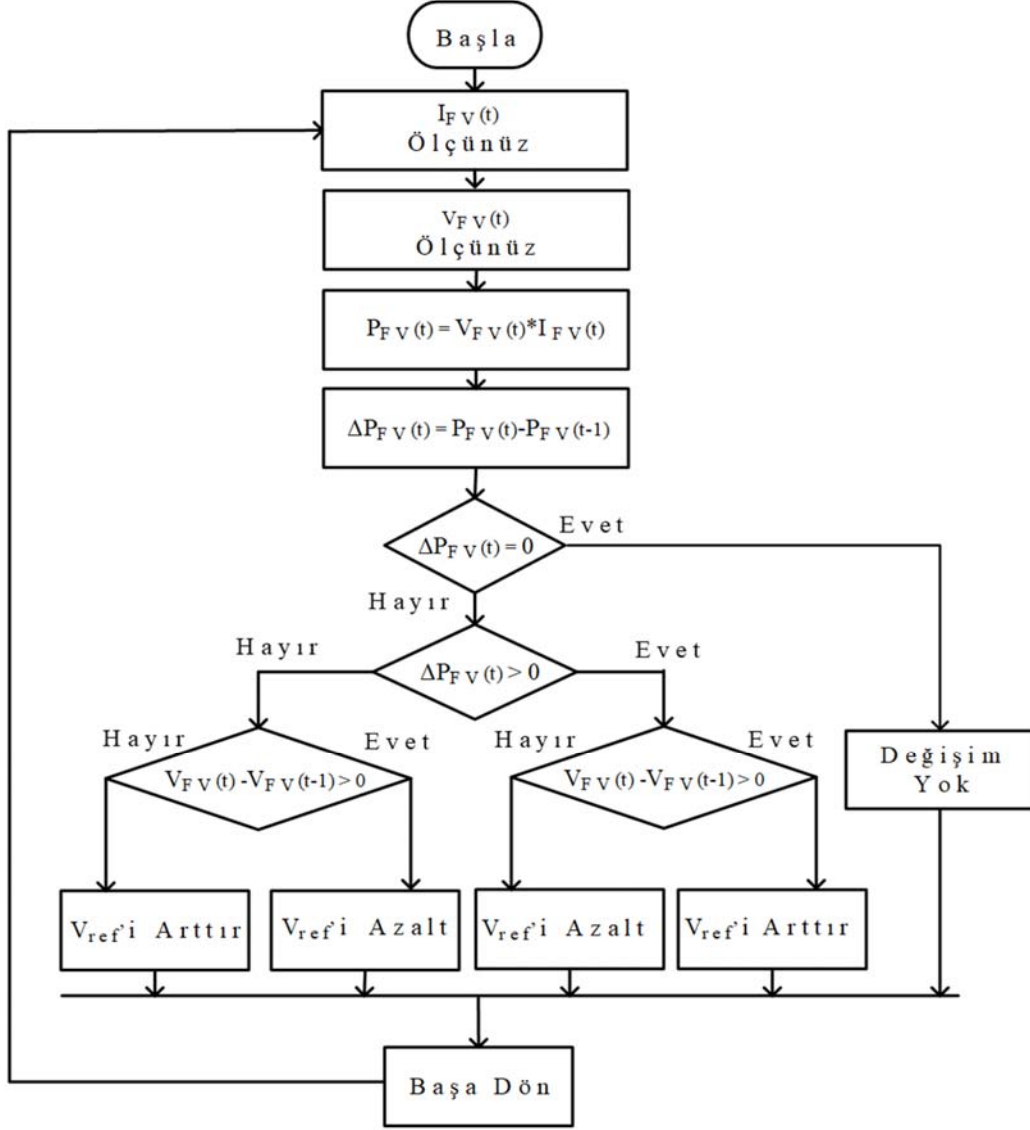
$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt \quad (13)$$

DA/DA yükselten tip dönüştürücünün çıkış gerilimi ve D&G MGNİ kontrolcüsü tarafından üretilen referans gerilimi karşılaştırılarak hata sinyali ($e(t)$) elde edilmiştir. Elde edilen $e(t)$, bir kontrol sinyali ($u(t)$) elde etmek için birbirine paralel bağlanmış K_p ve K_i ile Eş. 13’te verildiği gibi işlenmiştir.

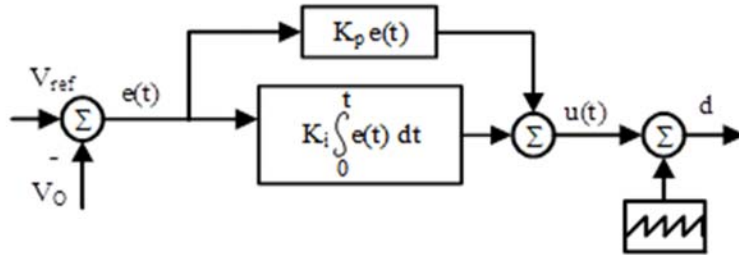
Görev çarpanı (d), testere dişi sinyali ve $u(t)$ karşılaştırılarak üretilmiştir. DA/DA yükselten tip dönüştürücünün çıkış gerilimi, tekrarlanan bu döngü sayesinde kontrol edilmiştir. Bu süreç Şekil 5’te gösterilmiştir. Bu çalışmada, akım kontrolü için kullanılan OKK kontrolcüsü için referans akımı üretmek için $u(t)$ kullanılmıştır.

4.3. Ortalama Kayan Kipli Kontrol (Average Sliding Mode (ASM) Control)

Bölüm 2’de detaylı olarak aktarılan DA/DA yükselten tip dönüştürücünün M anahtarı iletimde (I. Durum) ve kesimde (II.



Şekil 4. D&G MGNİ akış diyagramı (P&O MPPT flow chart)



Şekil 5. PI kontrolcü (PI controller)

Durum) olma durumları için verilen denklemler yeniden düzenlenerek Eş. 14'te görüleceği üzere ortalama durum uzay modeli elde edilmiştir [25].

$$\begin{bmatrix} \frac{dI_{FV}}{dt} \\ \frac{dV_o}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{(1-d)}{L} \\ \frac{(1-d)}{c} & \frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{FV} \\ V_o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} [V_{FV}] \quad (14)$$

OKK kontrolcü için referans akımı (I_{ref}), Eş. 15'te görüleceği üzere V_{PV} ve $u(t)$ 'nin çarpılmasıyla belirlendi. Elde edilen ortalama durum uzay modelinden elde edilen V_o ve V_o 'ın türevi Eş. 16'da verilen şartları sağladığı sürece OKK yöntemi doğru çalışmıştır. OKK kontrol yönteminde, KKK yöntemi için dış bozulmalara karşı hassasiyeti arttıran ve bu yöntemi dezavantajlı duruma getiren değişken frekanslı anahtarlama yerine rampa sinyali ile sabit hale getirilmiş bir

anahtarlama frekansı kullanılmıştır. Böylece çıkış akımı daha verimli bir şekilde kontrol edilmiştir. Eş. 14'te verilen ortalama durum uzay modelinden alınan I_{FV} 'nin türevi Eş. 17'de verilen denklemde yerine yazılırsa ve Eş. 18'de verilen kabul ile gerekli işlemler yapılırsa, Eş. 19'da verildiği gibi d hesaplanır [25]. Burada λ (Lamda) kayma yüzeyinin katsayısıdır [13].

$$I_{ref} = u(t) * V_{FV} \quad (15)$$

$$\frac{dV_o}{dt} < 0 \text{ eğer } V_{ref} < V_o \text{ ve } \frac{dV_o}{dt} > 0 \text{ eğer } V_{ref} > V_o \quad (16)$$

$$\left(\frac{dI_{ref}}{dt} - \frac{dI_{FV}}{dt}\right) = -\lambda(I_{ref} - I_{FV}) \quad (17)$$

$$L \frac{dI_{ref}}{dt} \approx 0 \quad (18)$$

$$d = \frac{V_o - V_{FV}}{V_o} + \lambda L \quad (19)$$

4.4. Önerilen Hibrit Kontrol Yöntemi (Proposed Hybrid Control Method)

FV panelini MGN'nda çalıştırabilmek için kullanılan D&G MGNİ kontrol yöntemi, çıkış gerilimini kontrol edilebilmesi için kullanılan PI kontrolcüsü ve çıkış akımının kontrol edilebilmesi için kullanılan OKK kontrolcüsü birbirine seri olacak şekilde bağlanmıştır ve böylece önerilen hibrit kontrol yöntemi elde edilmiştir (Şekil 6). Önerilen hibrit kontrol yönteminde, D&G MGNİ kontrolcüsüne gelen giriş gerilimi (V_{FV}) ve akımı (I_{FV}) ile hesaplanan giriş gücü, Şekil 4'te verilen akış diyagramına göre işlenip PI kontrolcüsü için bir referans gerilimi (V_{ref}) üretilmektedir. PI kontrolcüsü ile üretilen referans

gerilimi ve çıkış gerilimini karşılaştırarak bir kontrol sinyali ($u(t)$) üretilmektedir. OKK kontrolcüsü ile çıkış akımını kontrol edilebilmesi için bir referans akıma (I_{ref}) ihtiyaç vardır. I_{ref} , (V_{FV}) ve $u(t)$ çarpılmasıyla elde edilmiştir.

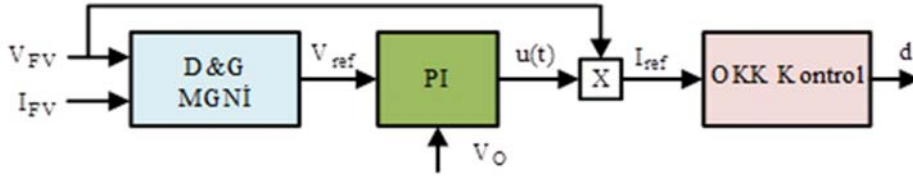
Önerilen hibrit kontrol yöntemi ile kontrol edilen şebeken bağımsız FV sistem Şekil 7'de verilmiştir. Bu FV sistemde seri bağlı üç kontrolcü ile sistem maksimum güç noktasında çalışmaya zorlanırken hem çıkış gerilimi hem de çıkış akımı kontrol edilmektedir.

5. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

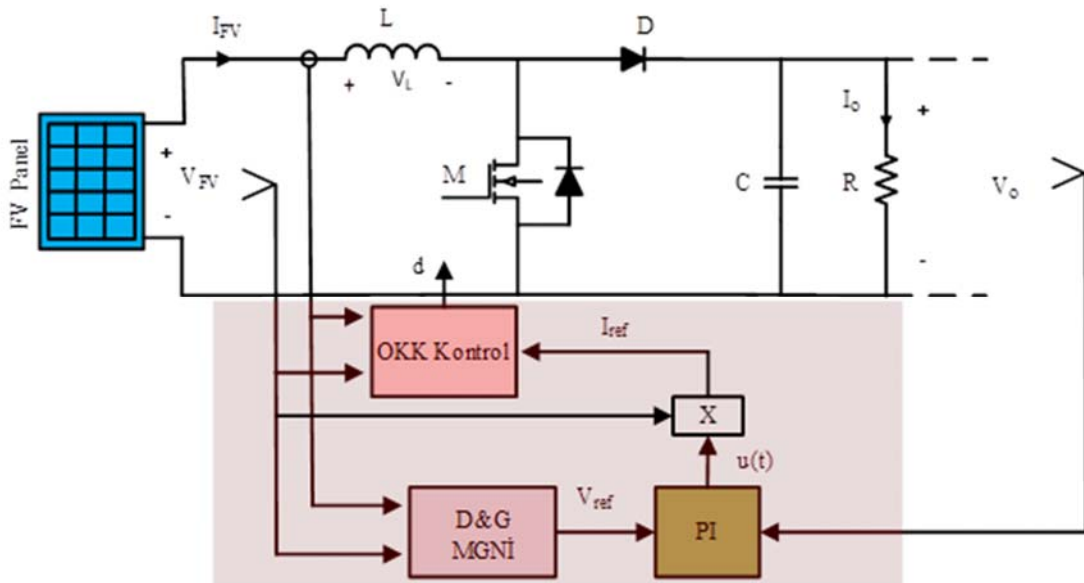
5.1. Benzetim Sonuçları (Simulation Results)

İkinci bölümde parametreleri belirlenen DA/DA yükselten dönüştürücü, benzetim çalışmaları için Matlab/Simulink ortamında tasarlanmıştır. İlk olarak tasarlanan dönüştürücü, seri bağlı MGNİ-PI kontrolcüsü ile kontrol edilmiştir. Daha sonra aynı dönüştürücü, önerilen hibrit kontrol yöntemi ile kontrol edilmiştir. Her iki kontrolcü için elde edilen benzetim sonuçları karşılaştırılmıştır. Yapılan benzetim çalışmasında FV panel 25 °C ortam sıcaklığında ve güneş ışınları metrekareye 1000W güç sağlarken (1000 W/m²) çalıştırılmıştır. MGNİ-PI ve önerilen hibrit kontrolcüler için DA/DA yükselten tip dönüştürücünün giriş gerilimi, akımı ve gücü Şekil 8'de verilmiştir. MGNİ-PI ve önerilen hibrit kontrolcüler için DA/DA yükselten tip dönüştürücünün çıkış gerilimi, akımı ve gücü Şekil 9'de verilmiştir.

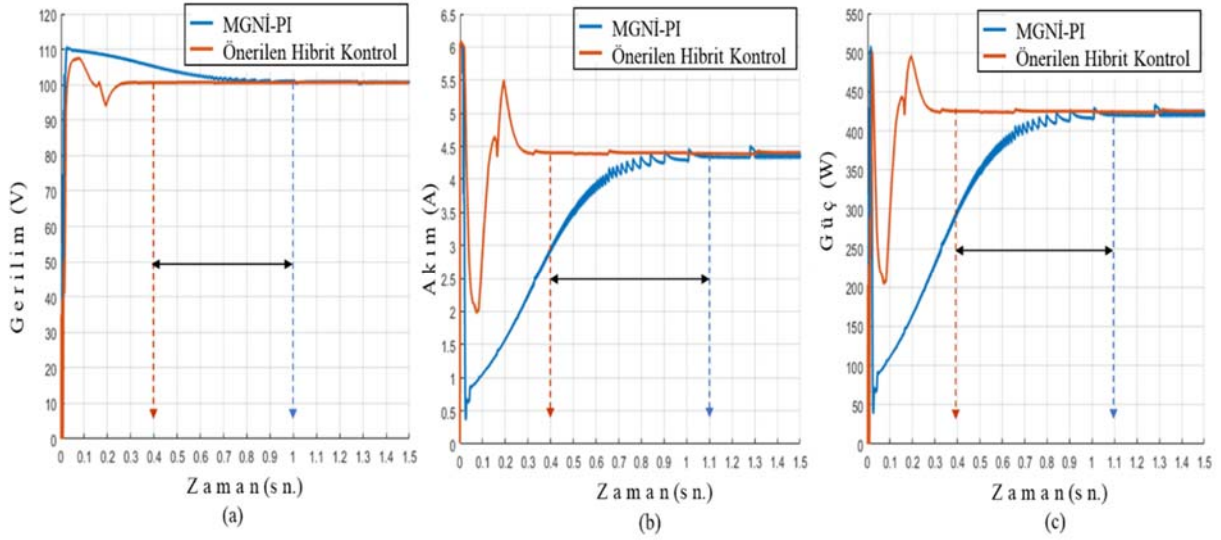
Önerilen hibrit kontrolcüsünün yükselme ve yerleşme zamanı Şekil 8 ve Şekil 9'da görüldüğü gibi MGNİ-PI'den daha kısadır. Dolayısıyla



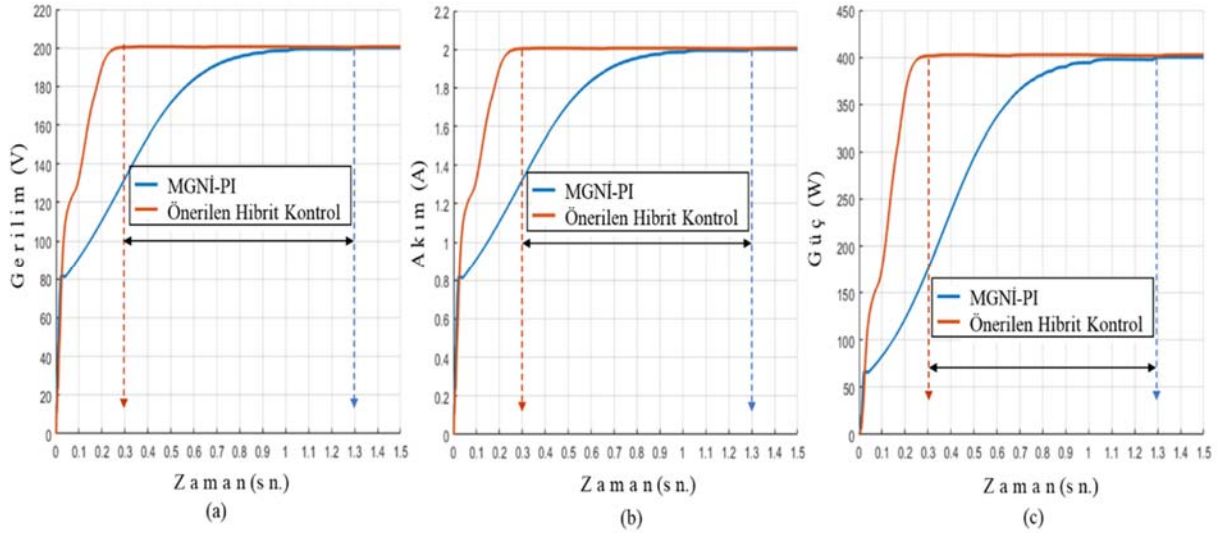
Şekil 6. Önerilen hibrit kontrol yöntemi (The proposed hybrid control method)



Şekil 7. Önerilen hibrit yöntem ile kontrol edilen sistem (The system with proposed hybrid control method)



Şekil 8. MGNI-PI ve önerilen hibrit kontrolcüler için sistemin giriş a) gerilimi b), akımı ve c) gücü
(The input (a) voltage, (b) current and (c) power of the system for MPPT-PI and proposed hybrid controllers)



Şekil 9. MGNI-PI ve önerilen hibrit kontrolcüler için sistemin çıkış a) gerilimi b), akımı ve c) gücü
(The output (a) voltage, (b) current and (c) power of the system for MPPT-PI and proposed hybrid controllers)

MGN'na ulaşmak için harcadığı süre (yakınsama zamanı) daha kısadır. Aynı zamanda giriş ve çıkış akımları da önerilen hibrit kontrolcü ile kontrol edilmiştir. Önerilen sistemin verimi, önerilen kontrol yöntemi sayesinde artırılmıştır.

5.2. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

FV paneller ve yardımcı devreler sayesinde güneş enerjisini elektrik kaynağı olarak kullanan DA/DA yükselten tip dönüştürücü tasarlanmıştır. Tasarlanan bu devreler ile Şekil 10'da verilen deney düzeneği kurulmuştur.

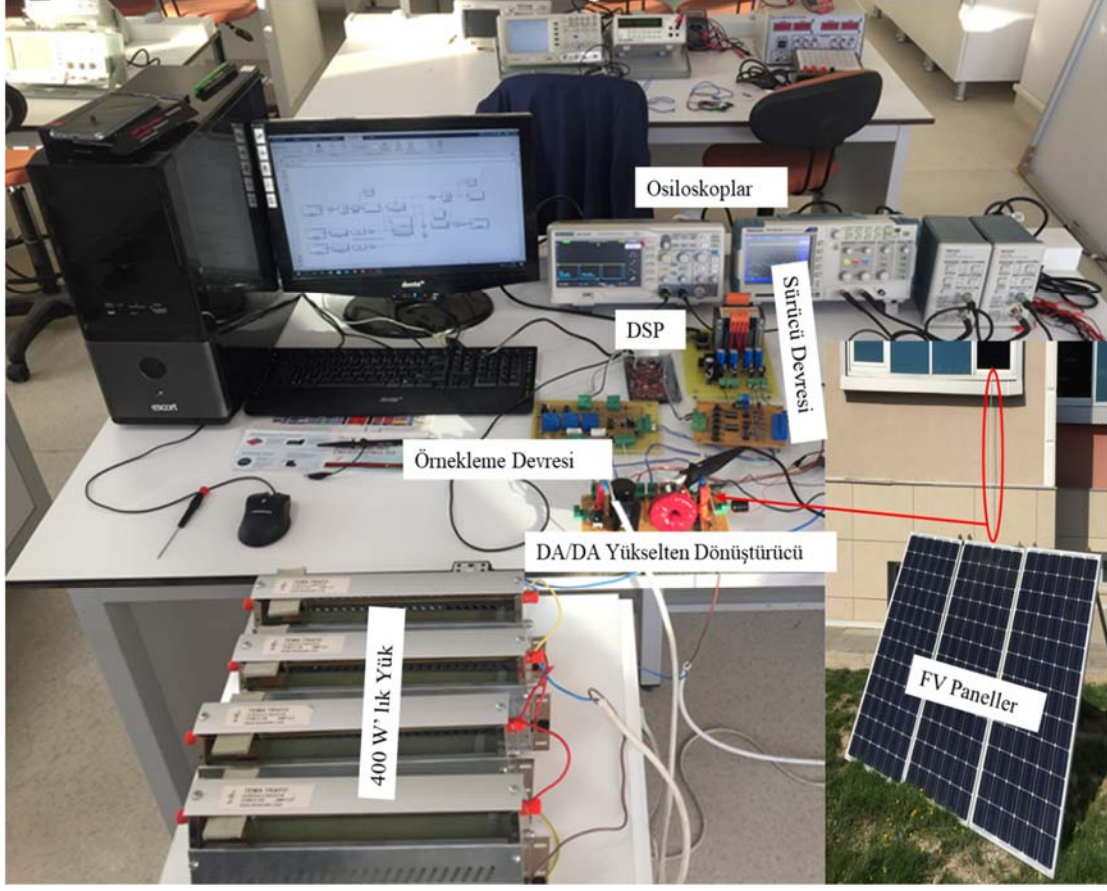
Önerilen hibrit kontrol yöntemi, DSP TMS320F28379D kontrol kartı ile deney düzeneğine uygulanmıştır. Şekil 10'da görüldüğü gibi üç adet SK125*125-M-72-195W model FV panel kullanılmıştır. Önerilen kontrol yöntemi ile kontrol edilen önerilen sistemin deneysel sonuçları Şekil 11'de verilmiştir. Giriş gerilimi (V_{FV}) ve akım (I_{FV});

çıkış gerilimi (V_o) ve akım (I_o) sırasıyla Şekil 11a ve Şekil 11b'de verilmiştir.

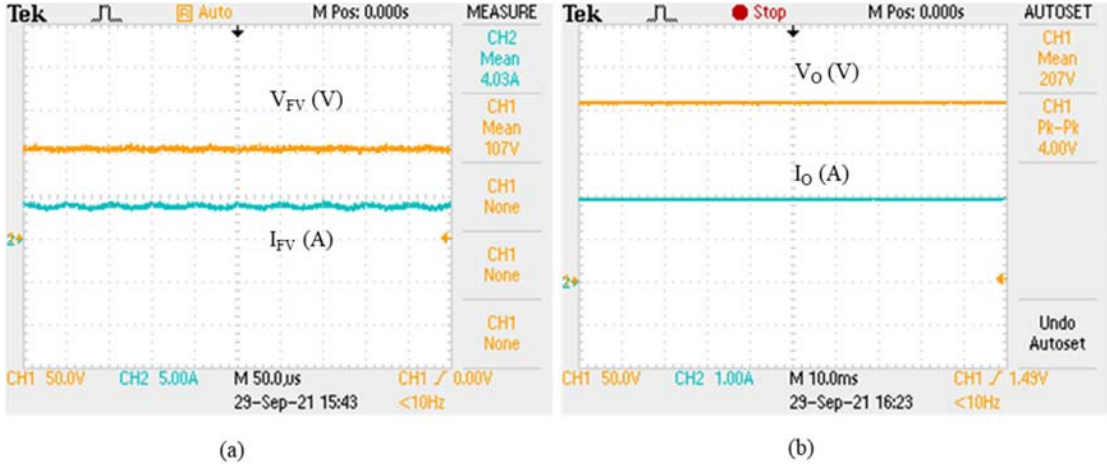
Önerilen sistemin farklı çıkış güçleri için verimliliği Tablo 2' de gösterilmiştir. Önerilen sistem farklı yüklerde (100 W ile 400 W arası) çalıştırıldığında sistemin veriminin %91,1 ile %94,5 arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Beklenildiği gibi güç değeri arttıkça verimin arttığı tespit edilmiştir.

Tablo 2. Farklı çıkış güçleri için sistemin verimliliği
(The efficiency of proposed system for different load power)

Yük gücü (W)	Verimlilik (%)
100	91,1
200	92,6
300	93,2
400	94,5



Şekil 10. Deneysel Düzeneği (The experimental set-up)



Şekil 11. Deneysel sonuçlar (The experimental results)

6. Sonuçlar (Conclusions)

FV panel, artan yarı iletken teknolojisi ile güneş enerjisinin %16 veya %21'ini elektrik enerjisine dönüştürülmektedir. FV panelinin MGN iklim koşullarına ve güneş konumu bağlı olarak sürekli değişmektedir. FV panelden mümkün olduğu kadar fazla güç çekebilmek için MGNİ kontrol yöntemi kullanılmıştır. FV panelinin çıkış gerilimi (V_{FV}) doğrusal değildir ve oldukça düşük seviyededir. DA/DA yükselten tip dönüştürücü, V_{FV} 'nin doğrusal hale getirilmesi, yükseltilmesi ve D&G MGNİ kontrol yönteminin uygulanabilmesi

için kullanıldı. DA/DA yükselten tip dönüştürücünün çıkış gerilimi (V_o), giriş gücüne ve yüke göre değişmektedir. Ancak V_o , yük ve güneşten gelen ışınların miktarından bağımsız olarak sabit olmalıdır, bu nedenle PI gibi bir gerilim kontrolcüsüne ihtiyaç vardır. PI kontrolcü yavaştır ve sadece gerilim kontrolü ile sistemden istenilen sonuçlar elde edilemeyebilir. Bu durumun üstesinden gelinmesi için kayan kipli kontrol (KKK) yöntemi ile hem hız artırılabilir hem de akım kontrol edilebilir. Ancak bu yöntemin çatırdamaya neden olan değişken bir anahtarlama frekansı vardır ve karmaşıktır. Bu nedenle KK kontrol yöntemini dezavantajlarını ortadan kaldıran OKK

kontrol yöntemi kullanılmıştır. FV panellerin kaynak olarak kullanıldığı DA/DA yükselten tip dönüştürücü, yukarıda açıklanan yöntemlerin seri olarak art arda bağlanmasıyla elde edilen MGNI-PI ve önerilen hibrit kontrolcüler ile kontrol edilmiştir. Kontrolcülerin hızlarını karşılaştırılması için önerilen sistem MATLAB/Simulink ortamında MGNI-PI ve önerilen hibrit kontrolcüler ile ayrı ayrı kontrol edilmiştir. Şekil 8 ve Şekil 9'da verilen MGNI-PI ve önerilen kontrolcüler ile kontrol edilen sistemin benzetim sonuçları, önerilen kontrol hibrit kontrol yönteminin çıkış akımını kontrol ettiğini ve daha kısa yakınsama süresine sahip olduğunu göstermiştir. Yakınsama süresinin kısa olması hem erişme hem de yerleşme süresini kısaltmıştır. Önerilen hibrit kontrol yöntemi ile FV panel maksimum güç noktasında çalıştırılırken aynı zamanda çıkış gerilimi ve akımı sırasıyla PI ve OKK kontrolcüler tarafından kontrol edilmiştir. Önerilen hibrit kontrol yöntemi ile kontrol edilen önerilen sistemin benzetim ve deneysel sonuçlardan görüleceği üzere çıkış güçleri yaklaşık 400 W civarındadır, çıkış akım ve gerilimleri sırasıyla yaklaşık olarak 2A ve 200V'tur. Hem benzetim hem de deneysel çalışma için 400W'lık sistemin giriş ve çıkış güçleri karşılaştırıldığında verimin %94 üstünde olduğu görülmüştür. Elde edilen veriler incelendiğinde benzetim ve deneysel sonuçların uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Benzetim ve deneysel sonuçlardan görüldüğü üzere önerilen hibrit kontrol yöntemi ile sistemin çıkışında herhangi bir salınım ve çatrırdama olmamıştır. Gelecekte, önerilen hibrit kontrol yöntemi, şebekeye bağlı, şebekeden bağımsız ve hibrit PV sistemlerine uygulanabilir.

Referanslar (References)

- Guo S., Liu Q., Sun J., Jin H., A review on the utilization of hybrid renewable energy, *Renewabl and Sustainable Energy Reviews*, 91, 1121-1147, 2018.
- Çelik İ., Yıldız C., Şekkeli M., Rüzgâr enerji santrali kurulumunda rüzgâr türbinlerinin mikro yerleşimi için bir optimizasyon modeli. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 6 (4), 898-908, 2018.
- Liu F., Duan S., Liu F., Liu B., Kang Y., A variable step size INC MPPT method for PV systems, *IEEE Transaction Industrial Electronics*, 55 (7), 2622-2628, 2008.
- Karafil A., Comparison of the various irregular pulse density modulation (PDM) control pattern lengths for resonant converter with photovoltaic (PV) integration, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36 (3), 1596-1611, 2021.
- Kotti R., Shireen W., Efficient MPPT control for PV systems adaptive to fast changing irradiation and partial shading conditions. *Sol. Energ.*, 114, 397-407, 2015.
- Krishnan G.S., Kinattingal S., Simon S.P., Nayak P.S.R., MPPT in PV systems using ant colony optimisation with dwindling population. *IET Renew. Power Gener.*, 14 (7), 1105-1112, 2020.
- Yılancı A., Performance analysis of a photovoltaic panel cooled by thermoelectric effect, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture Gazi University*, 35 (2), 619-634, 2020.
- Srinivas N., Singh S., Gowda M., Prasanna C., Modi S., Comparative Analysis of Traditional and Soft Computing Techniques of MPPT in PV Applications. *IEEE 4th International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON)*, Kuala Lumpur-Malaysia, 1-6, 24-26 September, 2021.
- Messalti S., Harrag A., Loukriz A., A new variable step size neural networks MPPT controller: Review, simulation and hardware implementation, *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 68, 221-233, 2017.
- Faranda R., Leva S., Energy comparison of MPPT techniques for PV systems, *WSEAS Transactions on Power Systems*, 3 (6), 446-455, 2008.
- Basha C.H., Rani C., Performance analysis of MPPT Techniques for dynamic irradiation condition of Solar PV. *Int. J. Fuzzy Syst.*, 22 (8), 2577-2598, 2020.
- Ghaderi D., Bayrak G., Guerrero J.M., Grid code compatibility and real-time performance analysis of an efficient inverter topology for PV-based microgrid applications, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, 128, 106712, 2021.
- Padhy S., Panda S., A hybrid stochastic fractal search and pattern search technique based cascade PI-PD controller for automatic generation control of multi-source power systems in presence of plug in electric vehicles, *CAAI Trans. Intell. Technol.*, 2 (1), 12-25, 2017.
- Ziegler J.G., Nichols N.B., Optimum settings for automatic controllers. *Trans. ASME*, 64 (11), (1942).
- Mahdavi J., Emadi A., Toliyat H.A., Application of State Space Averaging Method to Sliding Mode Control of PWM DC/DC Converters, *Conference Record of the 1997 IEEE Industrial Application Conference Thirty-Second IAS Annual Meeting, New Orleans, LA, USA*, 820-827, 5-9 Oct. 1997.
- Kocaarslan I., Kart S., Genc N., Uzmuş H., Design and application of PEM fuel cell-based cascade boost converter. *J. Electr. Eng.*, 101 (4), 1323-1332, 2019.
- Turan E., Bülent D.A.Ğ., Tamyürek B., Aydemir M.T., Design and implementation of an analog controller based on k-factor design method for a novel isolated Z-source DC-DC converter with high voltage gain, *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 9 (2), 317-334, 2021.
- Rashid M.H., *Power Electronics: Circuits, Devices, and Applications*. Pearson Education India, 2009.
- Jamaludin M.N.I., Tajuddin M.F.N., Ahmed J., Azmi A., Azmi S. A., Ghazali N. H., Alhelou H.H., An effective salp swarm based MPPT for photovoltaic systems under dynamic and partial shading conditions, *IEEE Access*, 9, 34570-34589, 2021.
- Hassan Q., Evaluation and optimization of off-grid and on-grid photovoltaic power system for typical household electrification. *Renew. Energy*, 164,375-90, 2021.
- Robles Algarin, C., Taborda Giraldo, J., Rodriguez Alvarez, O., Fuzzy logic based MPPT controller for a PV system. *Energies* 10 (12),2036-2054, 2017.
- Haji, D., Genc, N., Fuzzy and P&O Based MPPT Controllers Under Different Conditions. *IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA 2018) Paris, France*; 14-17 October 2018.
- Yahdou, A., Hemici, B., Djilali, A.B., Modified perturb and observe mppt control for avoid deviation in photovoltaic systems. *Journal of Electrical Engineering*, 17 (1), 10-20, 2017.
- Celik, E., Öztürk, N., First application of symbiotic organisms search algorithm to off-line optimization of PI parameters for DSP-based DC motor drives, *Neural Computing and Applications*, 30 (5), 1689-1699, 2018.
- Genc N., Uzmuş H., Iskender I., Dynamic Behavior of Dc-Dc Boost Converter Controlled with Cascade PI-ASC, *IEEE 8th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI)*, Ploiesti-Romania, 1-4, 30 June-2 July, 2016.