

Fırçasız DC Motor Sürücülü Solar FV-Batarya tabanlı Hibrit Su Pompalama Sisteminin Modellenmesi ve Optimizasyonu

Hale BAKIR^{1*}

¹Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Sivas

¹<https://orcid.org/000-0001-5580-0505>

*Sorumlu yazar: halebakir@cumhuriyet.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihiçesi:

Geliş tarihi: 02.12.2022

Kabul tarihi:02.07.2023

Online Yayınlanma: 25.06.2024

Anahtar Kelimeler:

Hibrit su pompa sistemi

SFV-batarya

Fırçasız DC motor

Çift yönlü kontrol

Genetik algoritma

ÖZ

Bu makale, sürekli ve tam hacimli su dağıtımını elde etmek için solar fotovoltaik (SFV) dizisi ve batarya deposuyla çalışan fırçasız DC (fırçasız DC motorlu su pompası) ile elde edilen SFV batarya tabanlı hibrit su pompalama sisteminin modellenmesini ve optimizasyon kontrolünü sunar. Su dağıtımının gerekli olmadığı durumlarda, SFV dizisi tarafından şarj edilir. Böylece batarya şarjı için harici güç kullanılmaz. Çift yönlü şarj kontrolü, bir buck-boost DC-DC dönüştürücü aracılığıyla batarya çalışma modunun otomatik olarak değiştirilmesine izin verir. Fırçasız DC motoru sürekli olarak nominal hızında ve yükünde çalıştırılır. MATLAB/SIMULINK platformunda önerilen su pompalamasının performans analizleri yapılmıştır. Optimizasyon yaklaşımı, genetik algoritma (GA) ile yapılmıştır ve sönümlenme katsayısı ile belirlenen geleneksel kontrol yöntemiyle karşılaştırılmıştır. İşlem, çift yönlü dönüştürücüde batarya kontrolü ve dc-link voltaj kontrolüne sahip bir kontrol sistemi içerir. Optimizasyon tekniği bir maliyet fonksiyonu minimize ederek, eş zamanlı iki PI kontrol edicisinin dört parametresini ayarlamak için kullanılır. Karşılaştırmalı analizler sonucunda, GA tekniğinin aşma ve oturma süresini en aza indirmede daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

Modeling and Optimization of Solar PV-Battery based Hybrid Water Pumping System with BLDC Motor Drive

Research Article

Article History:

Received: 02.12.2022

Accepted: 02.07.2023

Published online: 25.06.2024

Keywords:

Hybrid water pumping system

SPV-battery

Brushless DC motor

Bi-directional control

Genetic algorithm

ABSTRACT

This article presents the modeling and optimization control of SPV battery-based hybrid water pumping system achieved by solar photovoltaic (SPV) array and battery bank powered brushless DC (brushless DC motor water pump) to achieve continuous and full volume water delivery. Where water delivery is not required, it is charged by the SPV array. Thus, no external power is used for battery charging. Bidirectional charge control allows automatic switching of battery operating mode via a buck-boost DC-DC converter. The brushless DC motor is operated continuously at its rated speed and load. Performance analyzes of the proposed water pumping were made on the MATLAB/SIMULINK platformThe optimization approach was made with genetic algorithm (GA) and compared with the traditional control method determined by the damping coefficient. The process includes a control system with battery control and dc-link voltage control on the bidirectional converter. The optimization technique is used to set four parameter of two PI control parameters simultaneously, minimizing a cost function. As a result of the comparative analysis, it was seen that the GA technique gave better

1. Giriş

Solar fotovoltaik (SFV) ile çalışan su pompalamasında fırçasız DC (fırçasız DC motor sürücüsü), yüksek verimli, bakımı ve sürmesi kolay ve kompakt (Kumar ve Sing, 2016; Sing ve Kumar, 2016) olduğu için son zamanlarda daha fazla dikkat çekmiştir. Kesintili yapısı nedeniyle SFV, güvenilir olmayan ve kesintili su pompalamasına neden olur. Kötü iklim koşullarında ve güneş ışığının olmadığı durumlarda (gece) tüm su pompalama sisteminin durmasına neden olur. Ayrıca, su pompalamasının gerekli olmadığı yerlerde FV kurulumu ve diğer kaynaklar kullanılmaz. Bu sıkıntılı durumlardan dolayı sürekli olarak tam su dağıtımını isteniyorsa harici güç kaynağı gerekir. Uzak yerlerde, bir dizel jeneratör genellikle besleme için yedek olarak kullanılır (Kumar ve Singh, 2016; Kar ve ark., 2022). Son zamanlarda kirlilikten arındırılmış bir çevre sürdürmek ve enerji güvenliğine yönelik tehditleri azaltmak için bir dizel jeneratör kullanılmamalıdır. Güç yedeği olarak geriye kalan tek çözüm, bir batarya deposu kullanmaktır. Batarya ile çalışan bir SFV hibrit güç kaynağı, güvenilir bir su pompalama sistemi sağlar (Kumar ve Singh, 2016).

Bununla birlikte, artan elektrik talebi ile birlikte enerji tasarrufu ciddi bir sorun haline gelmiştir. BLDC motorlar, asenkron motorlara göre yüksek verim, yüksek güç yoğunluğu, yüksek tork/atalet oranı ve yüksek güç faktörü ile enerji verimli motorlar olarak kritik bir rol oynamaktadır (Kar ve ark., 2022). Bu motor, su pompalama dahil birçok uygulamada asenkron motorun yerini alır. Son çalışmalarda, SFV dizi beslemeli su pompalama sistemi için uygun maliyetli, basit ve verimli fırçasız DC motor sürücüsü önermektedir. Bir zeta dönüştürücü gibi dönüştürücü modelleri, SFV dizisinden (Kumar ve Singh, 2016) maksimum kullanılabilir gücü çıkarmak için kullanılır ve ayrıca çıkıntı minimum anahtarlama kayıplarıyla artıran pozitif serpiştirilmiş bir Luo dönüştürücü (I-Luo) kullanılır (Jegha ve ark., 2020). Matlab/Simulink 'de yapılan çalışmalar dinamik ve kararlı durumdaki su pompalamasının verimli bir şekilde çalıştığını gösteren farklı çalışma koşulları altında incelenmesi devam etmektedir (Kumar ve ark., 2020). Fırçasız DC motoru, FV dizisi tarafından iletilen gücü maksimize etmek ve pompalama sisteminin güvenilirliğini artırmak için kullanılır (Ammar ve ark., 2022). Güneş enerjili su pompalamanın etkili tasarımı, kontrolü ve daha iyi performansı için uygun FV teknikleri, pompalar, motorlar ve uygun optimizasyon algoritmalarının araştırmacılara faydalı olduğu çalışmalarda görülmektedir (Muralidhar ve Rajasekar, 2021).

Bu çalışmada, bir batarya deposunu şarj etmek/deşarj etmek için bir güç akışı kontrolü, çift yönlü yükseltici dönüştürücü kullanılmıştır (Ding ve ark., 2010; Khiareddine ve ark., 2015). Kontrol, SFV güç ve su talebinin mevcudiyetine göre bataryanın şarj/deşarj edilmesi gerekip gerekmediğine bağlıdır. Batarya, gece su pompalanması gerektiğinde veya gün boyunca tam hacimde su çıkışı olduğunda boşalır. Diğer taraftan; bir SFV gücü olduğunda, batarya yalnızca şarj edilir. Su pompası için gereken tüm güç SFV dizisinden sağlandığı durumda, su pompalamak için bataryaya ihtiyaç duyulmaz. Önerilen sistem, batarya için bir şarj kaynağı, bir SFV dizisi olarak işlev görür ve harici bir güç

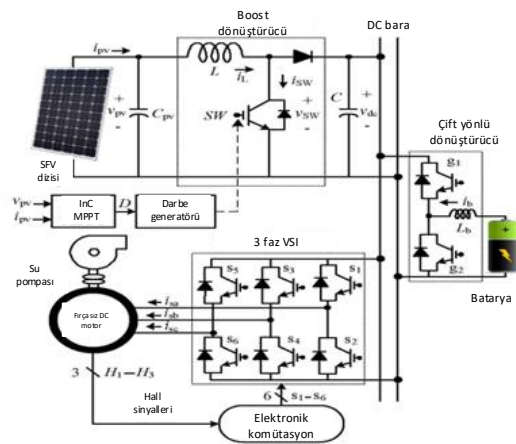
kaynağı gerekli değildir. Bu durumda hem motor pompa sisteminden hem de FV kurulumundan tam fayda sağlanır. Çift yönlü güç akışı, gerilim kaynağı invertörünün (VSI) DC barasına yerleştirilmiş ortak bir kapasitör aracılığıyla çift yönlü güç akışı sağlar. VSI'nin DC bağlantı gerilimi, fırçasız DC motor pompasının hızı nominal değerinde tutulacak şekilde düzenlenir. Ancak geleneksel oransal-integral (PI) denetleyici ile elde edilen kazanç sabitleri ile kontrolde tam oranlı kontrol sağlanamamakta, optimizasyon algoritması eklenerek tam nominal değerde tutulmakta, optimizasyon tekniği ile sabit değerde tutulmaktadır. Batarya akım değerinin kontrol edildiği PI kontrolör ve aynı anda DC-link voltajının kontrol edildiği PI kontrolör ile sağlanır. Bu uygulama suyun tam verimde ve kapasitede pompalanmasını sağlar (Kumar ve Singh, 2016).

Bu makale, SFV-batarya tabanlı hibrit güç kaynağına dayalı bir fırçasız DC motorlu pompalama sisteminin modellenmesini ve hibrit bir sistemin eş zamanlı optimizasyonunu önermektedir.

2. Materyal ve Metot

SFV-batarya tabanlı hibrit su pompalama sistemi

Modellenmiş ve optimize edilmiş hibrit su pompalama sisteminin konfigürasyonu Şekil 1'de gösterilmektedir. Bir SFV dizisi yoluyla ve çift yönlü bir buck boost dönüştürücü ile bir batarya depolama, ortak bir DC bara oluşturur. Bu ortak DC veri yolu, bir VSI aracılığıyla bir fırçasız DC motor pompasına güç sağlar. DC-DC yükseltici dönüştürücü aracılığıyla SFV dizisinin maksimum güç noktasını (MPPT) gerçekleştirmek için artımlı bir iletkenlik (InC) tekniği kullanılır. Bir buck-boost dönüştürücü, batarya için bir şarj kontrolörü görevi görür. Dönüştürücü, yükseltici dönüştürücü görevi görür (batarya boşaldığında) ve batarya, ortak DC barasını besler. Bir VSI, fırçasız DC motorunun elektronik komütasyonunu gerçekleştirir. Komütasyon (Kumar ve Singh, 2016) için Hall sinyalleri üretmek üzere üç dahili Hall Etkisi sensörü ile fırçasız DC motorun miline bir santrifüj su pompası bağlanmıştır. Temel bir FV sistemi dört bölümden oluşur: FV dizisi, güç regülatörü, depolama sistemi ve FV invertörüdür.



Şekil 1. SFV batarya tabanlı hibrit su pompalama sistemi

voltajını ve dolayısıyla çalışma hızını düzenleyerek; tam verimde su pompalamak için gereken gücün tam miktarını sağlar. (Sigarchian ve ark.,2016) tarafından önerilen fırçasız DC motor sürücüsü, faz akım sensörlerini ortadan kaldırarak basit ve uygun maliyetli kontrol sağlar.

Genetik algoritma (GA) tekniği

GA'lar, bir amaç fonksiyonunu formüle etmek için gerekli olan global optimizasyon teknikleridir. PI parametrelerini ayarlamak için bir GA uygulanır.

Geniş bir çalışma koşulları aralığında tüm modlar için kabul edilebilir bir sönümleme elde etmek için optimum konumu elde etmenin yanı sıra stabilizatör sayısını azaltır. 0,05 s değerindeki minimum sönümleme oranı, küçük bir güvenlik marjı sağlar (Bakir ve ark.,2020). Önerilen tekniğin bir akış şeması Şekil 3'de gösterilmektedir ve aşağıdaki adımlarla açıklanabilir.

1. Kromozom popülasyonu oluştur: PI parametrelerini ve konum indeksini temsil edecek popülasyon tipini seçilir. Her PI'nin iki parametresi vardır (K_p , K_i). Bir dizi PI'a sahip her kapalı döngü sistemi için bir konum indeksi belirtilir. Değişkenlerin üst ve alt sınırları da belirtilir.

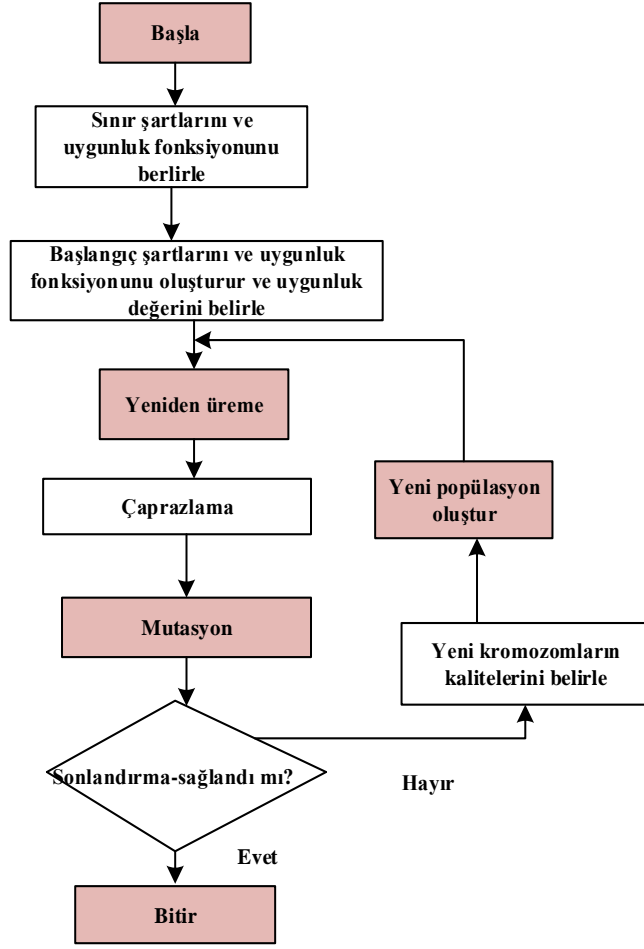
2. Amaç fonksiyonları: PI'ların parametreleri, konumları ve sayıları, bir maliyet fonksiyonunu minimize etmek için kullanılır $f(x)$,

$$\min f(x) = [f_1(x), f_2(x), \dots \dots f_N(x)] \quad [1]$$

Burada $f(x)$, PI'nin işlevi temsil eder ve N , sistemdeki bir iterasyon sayısıdır.

$f(x)$ bir kısıtlama sınırına tabidir, alt (l_b) ve üst sınırları (u_b) vardır.

$$l_b \leq x_i \leq u_b \quad [2]$$



Şekil 3. Genetik algoritma akış şeması

Aşağıdaki parametreler kullanılarak gerçekleştirilen GA tekniği (Bakir ve ark.,2021)'de detaylandırılmıştır.

Değişken sayısı: 4

İterasyon sayısı (N): 100

Popülasyon büyüklüğü: 50

Mutasyon oranı: 0,01

Geçiş oranı: 0,8

Geleneksel PI kontrolü doğal frekansını (ω_n) ve parametrelerini (K_p , K_i) değerlendirmek için oturma süresini (t_s) ve sönümlenme katsayısını (ε) seçerek ikinci dereceden bir sistem yanıtına dayanır (Bakir ve ark., 2020; Bakir ve ark., 2021).

Bir adım yanıtı için sönümlenme katsayısının, doğal frekansın ve oturma süresinin seçilen değerlerini kullanır. Kontrol parametreleri ifadeleri aşağıdaki denklemler kullanılarak elde edilir,

$$w_n = \frac{4.6}{t_s * \varepsilon} \quad [3]$$

$$K_p = \frac{2\varepsilon w_n}{v_{max}} \quad [4]$$

$$K_i = \frac{w_n^2}{v_{max}} \quad [5]$$

Optimizasyon için performans kriterleri; Bu çalışmada optimizasyon algoritmaları için performans kriteri olarak zaman ağırlıklı integral kare hatası (ITSE) ve integral kare hatası (ISE) kullanılmıştır.

Performans kriterlerinin ifadeleri şu şekilde verilir,

$$ITSE = \int_0^{\infty} t e^2(t) dt \quad [6]$$

Optimizasyon hedefi, izleme hatalarını (e_v , e_b) en aza indirmek için PI kontrol parametrelerini ayarlamaktır. Ağırlık faktörü w ile amaç fonksiyonu, aşağıdaki gibi ITSE performans kriteri kullanılarak tanımlanır,

$$F(X) = [w] \begin{bmatrix} \int_0^T t e_v^2 dt \\ \int_0^T t e_b^2 dt \end{bmatrix} \quad [7]$$

Tablo 1. Optimizasyon sonuçları

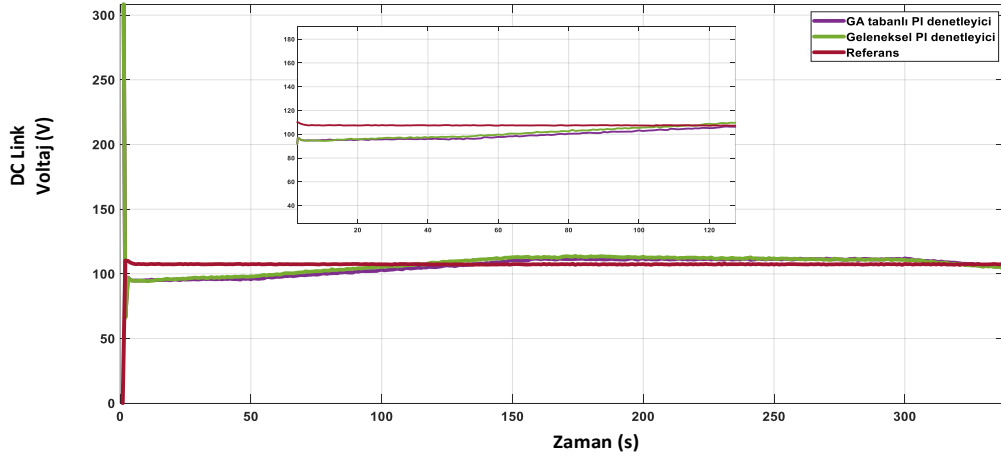
Performans testleri	Kazanç parametreleri	GA optimizasyon tekniği sonuçları
ITSE	DC-link voltajı PI kontrolü ($K_{p1} - K_{i1}$)	0,9674-0,3701
	Batarya akımı PI kontrolü ($K_{p2} - K_{i2}$)	0,3350-0,8347
ISE	DC-link voltaj PI kontrolü ($K_{p1} - K_{i1}$)	0,9961-0,0056
	Batarya akımı PI kontrolü ($K_{p2} - K_{i2}$)	0,9756-0,8414

Sonuçlar ve Tartışma

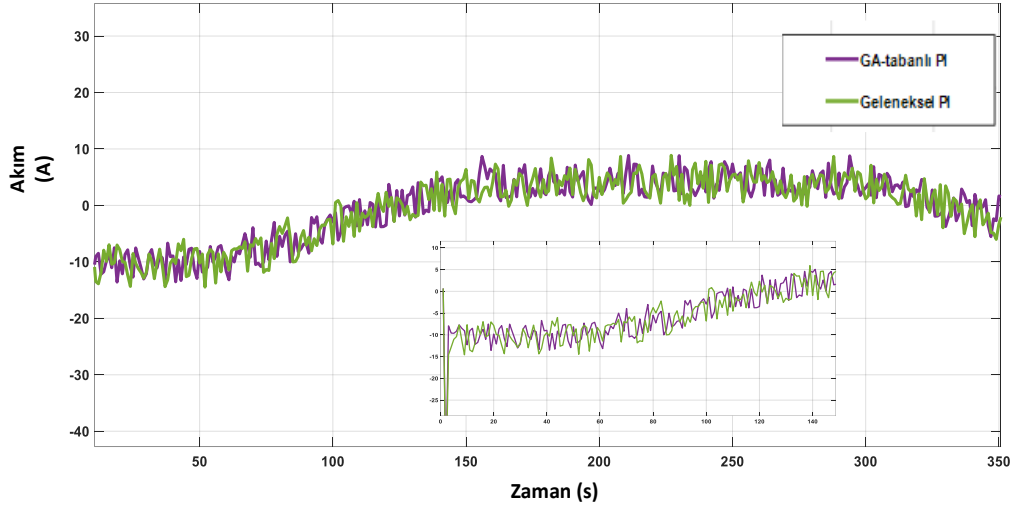
Önerilen hibrit su pompalama sisteminin modellenmesi, optimizasyonu ve performans analizi MATLAB/Simulink araç kutuları kullanılarak yapılmıştır. 1,92 kW pik güç ve 72 V SFV dizisinden oluşan hibrit üretim ünitesi; 300 Ah kurşun-asit batarya 110V,5,2 Nm fırçasız DC motor pompasını 2500 dev/dk'da beslenmektedir. ISE, ITSE performans testleri kullanılarak GA optimizasyon yöntemi uygulanmıştır, iterasyon sayısı 100 alınmıştır. Sönümlenme katsayısı ile bulunan geleneksel yöntemler ile elde edilen parametreler ile GA algoritması ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Optimizasyon, Radeon Graphics 2,90 GHz ile AMD Ryzen 7 4800H işlemcili bir bilgisayarda yapılmıştır. Optimizasyon sonucunda elde edilen parametreler Tablo 1'de verilmiştir. Ortalama hata tespit kriterleri açısından değerlendirildiğinde, GA'nın performansı geleneksel yöntem ile bulunan kazanç parametrelerine göre daha etkili olmuş, daha etkin bir kontrol sağlamıştır. Optimizasyon yönteminde kullanılan SFV-bataryalı su pompası sistem modeli 2500 dev/dk sabit devirde olacak şekilde sabit bir rotor hızında çalıştırılmıştır. Çalışmanın amacı, referans geçişlerde optimizasyon yöntemi için kontrol performansını belirlemektir. DC link voltajı ve batarya akımı için tanımlanmış referansları izlemek kontrolün amacıdır. Şekil 4, izleme yanıtlarının sonuçlarını göstermektedir. GA tabanlı PI kontrol edicinin cevabı, daha iyi oturma süresi ile düşük aşma ile sönümlenirken, geleneksel tabanlı PI kontrolünün dc link voltaj değerinin sabit tutulmasında, Şekil 4 (a)'da belirli bir aşma ile yetersiz sönümlenmiştir. Şekil 4(a)'da Simulink'te yapılan dinamik analizler sonucunda, geleneksel

yöntem ile belirlenen PI parametreleri ile sağlanan dc-link gerilim kontrolünde aşma değeri (overshoot) %8,9 iken, GA optimizasyon algoritması sonucunda elde edilen PI parametreleri kullanıldığında aşma %7,44 değerindedir. Aynı şekilde, oturma süresi incelendiğinde, geleneksel yöntemde 160,5 s oturma süresi (settling time) iken, GA tabanlı yöntem ile 155,8 s oturma süresine azaltılmıştır. Şekil 4(b)'de akım kontrolü için referans değerini takip etmede iki yöntemde aynı cevabı vermiştir. Harmonik ve dalgalanmaların fazla olduğu görülmektedir, daha iyi bir optimizasyon aracı ile gelecekteki çalışmalarda karşılaştırılmalar sağlanacak ve bu dalgalanmalar azaltılacaktır. Şekil 4 (c)'de hızın 2500 dev/dk seviyesine gelmesi ve oturma süresi açısından GA tabanlı yöntemde daha iyi bir oturma süresi olduğu görülmektedir, geleneksel yöntemde tüm zaman(s)'lerde 2500 referans değerinde sabit kalamadığı görülmektedir.

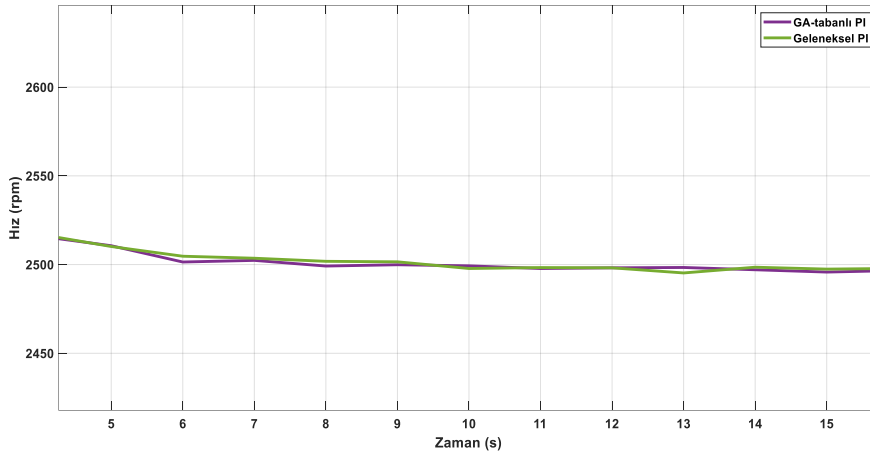
Sonuç olarak, Optimizasyon tekniği bir maliyet fonksiyonu minimize ederek, eş zamanlı iki PI kontrol edicisinin dört parametresini ayarlamak için kullanılmıştır. Karşılaştırmalı analizler sonucunda, GA tekniğinin aşma ve oturma süresini en aza indirmede daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Rüzgar, güneş ve mikro-şebekeler, hibrit sistemlerde gerilim ve güç kontrolü önemlidir ve bu kontroller PI kontrol ile başarılıdır. İstenilen kontrolün sağlanması için PI parametreleri belirlenmesi önem kazanmaktadır ve bu parametrelerin optimizasyonu için halen çalışılmakta ve en iyi optimizasyon aracı bulmak için araştırmalar sürdürülmektedir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 4 (a) DC-bara gerilimi (b) batarya akımı (c) hız(Optimizasyon tekniklerinin sabit rotor hızı altında izlem cevapları)

Sonuçlar

Bir SFV batarya hibrit kaynağı ile çalışan bir fırçasız DC motorlu su pompalaması tasarlanmış ve optimizasyon algoritmaları kullanılarak kontrolü analiz edilmiştir. Su pompalama sisteminin optimizasyonu ile güvenilir bir kontrol sistemi sağlanmıştır. SFV dizisinden ve pompalama sisteminden tam anlamıyla yararlanmak mümkündür. Batarya deposu ile DC barası arasında çift yönlü bir yükseltici dönüştürücü aracılığıyla olası güç aktarımını sağlamak için bir güç akışı kontrolü uygulanmıştır. Azaltılmış sensör tabanlı fırçasız DC motor sürücüsü, düşük maliyetli ve kompakt bir pompalama sistemi sağlanmıştır. Optimizasyon teknikleri karşılaştırılarak akım kontrolü ve gerilim kontrolü sağlanmıştır. Önerilen optimizasyon tekniği ile su pompalama sisteminde verim artışı gerçekleştirilmiştir. Bu sistemin şebeke dışı, uzak ve izole alanlar için daha kullanışlı olacağı öngörülmektedir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarı herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Yazar makaleye %100 oranında katkı sağlamış olduğunu beyan eder.

Kaynakça

- Ammar A., Hamraoui K., Belguellaoui M., Kheldoun A. Performance enhancement of photovoltaic water pumping system based on BLDC motor under partial shading condition. *Engineering Proceedings* 2022; 14(1): 22.
- Bakir H., Merabet A., Dhar RK., Kulaksiz AA. Bacteria foraging optimisation algorithm based optimal control for doubly-fed induction generator wind energy system. *IET Renewable Power Generation* 2020; 14(11): 1850-1859.
- Bakir H., Merabet A., Dhar RK., Kulaksiz AA. Experimental evaluation of water cycle technique for control parameters optimization of double-fed induction generator-based wind turbine. *Engineering Science and Technology, an International Journal* 2021; 24(4): 890-898.
- Ding F., Li P., Huang B., Gao F., Ding C., Wang C. Modeling and simulation of grid-connected hybrid photovoltaic/battery distributed generation system. *CICED 2010 Proceedings* 2010; 1-10.
- Elgendy MA., Atkinson DJ., Zahawi B. Experimental investigation of the incremental conductance maximum power point tracking algorithm at high perturbation rates. *IET Renewable Power Generation* 2016; 10(2): 133-139.
- Jegha ADG., Subathra MSP., Kumar NM., Ghosh A. Optimally tuned interleaved Luo converter for PV array fed BLDC motor driven centrifugal pumps using whale optimization algorithm—a resilient solution for powering agricultural loads. *Electronics* 2020; 9(9): 1445.
- Kar BN., Samuel P., Pradhan JK., Mallick A. Grid-connected solar photovoltaic-fed brushless DC motor drive for water pumping system using colliding body optimization technique. *Circuit World* 2022; ahead of print.
- Khiareddine A., Salah CB., Mimouni MF. Power management of a photovoltaic/battery pumping system in agricultural experiment station. *Solar Energy* 2015; 112: 319-338.
- Kumar R., Singh B. Solar PV-battery based hybrid water pumping system using BLDC motor drive. *IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES)*, 2016, sayfa no: 1-6, Delhi, India.
- Kumar R., Singh B. BLDC motor driven solar PV array fed water pumping system employing zeta converter. *IEEE Transactions on Industry Applications* 2016; 52(3): 2315-2322.

- Kumar R., Singh B. Grid interfaced solar PV based water pumping using brushless DC motor drive. 2016 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), 2016, sayfa no:1-6, Trivandrum, India.
- Kumar H., Pandey K., Kumar R., Jangir AK. BLDC motor driven water pump fed by solar photovoltaic array using boost converter. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT) 2020; 9(6): 635-639.
- Muralidhar K., Rajasekar N. A review of various components of solar water-pumping system: configuration, characteristics, and performance. International Transactions on Electrical Energy Systems 2021; 31(9): e13002.
- Sigarchian SG., Malmquist A., Fransson T. Modeling and control strategy of a hybrid PV/wind/engine/battery system to provide electricity and drinkable water for remote applications. Energy Procedia 2016; 57: 1401-1410.
- Sing B., Kumar R. Simple brushless DC motor drive for solar photovoltaic array fed water pumping system. IET Power Electronics 2016; 9: 1487-1495.
- Singh B., Kumar R. Solar photovoltaic array fed water pump driven by brushless DC motor using Landsman converter. IET Renewable Power Generation 2016; 10(4): 474-484.