

Araştırma Makalesi / Research Article

Üç Fazlı Şebeke Bağlantılı Fotovoltaik Eviricinin YSA Tabanlı Öngörülü Kontrolü

Süleyman YARIKKAYA^{1*}, Kadir VARDAR²

^{1*} Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Yazılım Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar, Türkiye,
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1582-6588>, syarikkaya@aku.edu.tr

² Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Kütahya, Türkiye,
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0197-0215>, kadir.vardar@dpu.edu.tr

Geliş/ Received: 24.02.2025;

Revize/Revised: 14.04.2025

Kabul / Accepted: 05.05.2025

ÖZET: Günümüzde sürdürülebilir enerji için yenilebilir enerji kaynaklarının kullanımı kritik bir öneme sahiptir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan güneş enerjisinin kullanımı için yaygın olarak fotovoltaik (PV) sistemler tercih edilmektedir. PV sistemlerin kullanımının yaygınlaşmasıyla birlikte PV sistemlerin verimliliği de önem kazanmıştır. Şebeke bağlantılı sistemlerde, şebeke ile senkronizasyon çok önemlidir. Senkronizasyonu etkileyen önemli etkenlerden biri donanımsal ve yazılımsal gecikmelerdir. Evirici devrelerinde, öngörülü kontrolcüler kullanılarak sistemde oluşacak gecikmelerin etkisi azaltılabilmektedir. Bu çalışmada, öngörülü bir akım kontrolcüsü kullanılarak sistem verimliliğinin artırılması amaçlanmıştır. Bundan dolayı, üç fazlı şebeke bağlantılı tek aşamalı PV evirici sistem kontrolünde kullanılması için öngörülü yapay sinir ağı (YSA) tabanlı bir akım kontrolcüsü önerilmektedir. Bu çalışmada ilk olarak, Matlab/Simulink ortamından 4kVA'lık üç fazlı şebeke bağlantılı bir PV evirici modellenmiştir. Benzetimde iki farklı akım kontrolcüsü kullanılmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. İlk PV evirici sistemde, akım kontrolcüsü olarak Oransal İntegratör (PI) kullanılmıştır. Daha sonra sistemde PI akım kontrolcüsü ve Referans Akım Öngörücü YSA (RefPNN) içeren bir benzetim yapısı kullanılarak PI tabanlı bir Referans Öngörülü YSA (PI-PNN) akım kontrolcüsü tasarlanmış ve eğitilmiştir. Yapılan simülasyon çalışmasından elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında PI-PNN'nin, PI akım kontrolcüsüne göre daha verimli olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yapay sinir ağları, Öngörülü akım kontrolcüsü, Şebeke bağlantılı PV evirici

*Sorumlu yazar / Corresponding author: syarikkaya@aku.edu.tr

Bu makaleye atıf yapmak için /To cite this article

ANN based Predictive Control of Three Phase Grid Connected Photovoltaic Inverter

ABSTRACT: Today, using renewable energy sources is critically essential for sustainable energy. Photovoltaic (PV) systems are widely preferred for using solar energy, one of the renewable energy sources. With the widespread use of PV systems, their efficiency has also gained importance. In grid-connected systems, synchronization with the grid is critical. One of the essential factors affecting synchronization is hardware and software delays. Inverter circuits, the effect of delays in the system can be reduced using predictive controllers. Inverter circuits, the effect of delays in the system can be reduced using predictive controllers. This study aims to increase the system efficiency using a predictive current controller. Therefore, a predictive artificial neural network (ANN) based current controller is proposed for three-phase grid-connected single-stage PV inverter system control. In this work firstly, a 4kVA three-phase grid-connected PV inverter is modeled in a Matlab/Simulink environment. Two different current controllers are used in the simulation, and the obtained results are compared. The Proportional Integrator (PI) was used as the current controller in the first PV inverter system. Then, a PI-based Reference Predictive ANN (PI-PNN) current controller was designed and trained using a simulation structure that includes a PI current controller and a Reference Predictive ANN (RefPNN) in the system. When the results obtained from the simulation study were compared, it was determined that PI-PNN was more efficient than the PI current controller.

Keywords: Artificial neural networks, Predictive current controller, Grid connected PV inverter

1. GİRİŞ

Güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren fotovoltaik (Photovoltaic, PV) evirici sistemlerin kullanımı son yıllarda artmıştır. Şebekeye bağlı PV evirici sistemlerde üretilen güç, anlık olarak şebekeye aktarılmaktadır ve herhangi bir depolama elemanına ihtiyaç duyulmamaktadır. Bu sayede hem depolama maliyetinden tasarruf edilmekte hem de daha verimli bir yapı oluşturulmaktadır (Arulkumar ve ark., 2016). PV evirici sistemler, PV modüllerde üretilen doğru akım (DC) gücünü, beslenecek şebekeye uygun alternatif akım (AC) güce dönüştürürler (Carrasco ve ark., 2006). Şebekeye bağlı PV evirici sistemlerinin verimliliğini etkileyen önemli bir etken de DC'den AC'ye dönüşümünün verimliliğidir (Boumaaraf ve ark., 2015). DC'den AC'ye güç dönüşümü ve şebeke ile senkronizasyonu, evirici devreleri kullanılarak yapılmaktadır. Güç dönüşümünde üç fazlı voltaj kaynaklı evirici (Voltage Source Inverter, VSI) devreleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Birçok çalışmada, çıkışında pasif filtre kullanılan VSI eviriciler tercih edilmektedir (Hannan ve ark., 2010; Leon ve ark., 2016).

Güç elektroniğinde ve eviricilerde, matematiksel modelden bağımsız olarak kullanılabilen yaklaşımlar günümüzde artmıştır. Böylelikle, matematiksel modele ve kontrol parametresi ayarlamaya ihtiyaç duyulmadan eviriciler kontrol edilebilmektedir. Bu yaklaşımlardan en yaygın olarak kullanılan yöntem Yapay Sinir Ağları (YSA)'dır. İnsan beynini taklit eden YSA içerisindeki nöronlar istenilen kontrol çıkışını verecek şekilde eğitime çalışılmaktadır. Bu amaçla, önce sistemin benzetimi yapılarak gerekli olan eğitim veri seti çevrim dışı olarak elde edilmektedir. (I. S. Mohamed ve ark., 2019). Matematiksel modeli karmaşık olan ve doğrusal olmayan ayrık zamanlı sistemlerin kontrolünde YSA kullanımı oldukça faydalıdır. Ayrıca YSA'lar olası hatalı girişlere karşıda toleransa sahiptir (Harashima ve ark., 1989; Shuzhi Sam Ge ve ark., 2008).

PV sistemlerin verimliliğini artırmak amacıyla farklı güç kademelerinde kullanılan çeşitli YSA çalışmaları mevcuttur. Mohamed ve arkadaşları, (2019)'da yaptıkları çalışmada üç fazlı şebeke bağlantılı bir DC-DC dönüştürücüsüne sahip bir PV sistem için adaptif bir PI kontrolcüsü önermişler. Bu kontrolcü DC bara voltajını, şebekeye enjekte edilen gücü ve harmoniklerin azaltılmasını denetlemektedir. Önerilen denetleyicide, PI kontrol parametreleri, öngörülü sinir ağı denetleyicisi (Predictive Neural Network Controller, PNNC) kullanılarak sürekli olarak ayarlanmaktadır. Sistem, MATLAB/Simulink ortamında modellenerek farklı çalışma koşulları için test edilmiş (A. A. S. Mohamed ve ark., 2019).

Şebeke bağlantılı PV sistemlerde güneş panelinin güç noktasının takibinde veya evirici kontrolünde de YSA'lar kullanılmaktadır. PV sistemlerinde kullanılan geleneksel Maksimum güç noktası takibi (Maximum Power Point Tracking, MPPT) yöntemleri, güç noktası çevresinde salınımlara neden olabilmektedir. Vora ve arkadaşları tarafından 2024 yılında gerçekleştirilen bir çalışmada Derin öğrenme ve takviyeli öğrenmenin entegrasyonu olan Derin Q-öğrenme yöntemi MATLAB/Simulink ortamında şebekeye bağlı bir PV sistem üzerinde uygulanmıştır. MPPT algoritması olarak tasarlanan bu kontrolcü ile DC-DC yükseltici devresi kontrol edilmiştir (Vora ve ark., 2024). Literatürde, MPPT fonksiyonunun yerine YSA öneren çeşitli çalışmalar mevcuttur (Babaie ve ark., 2020; Boumaaraf ve ark., 2015).

PV sistemlerde kullanılan eviricinin kontrolüne odaklanan bir başka çalışmada, MATLAB/Simulink ortamında tek fazlı iki aşamalı bir PV evirici sisteminde eviricinin kontrolü için YSA önerilmektedir (Bouaouaou ve ark., 2022; Rajab Al-Jaboury ve ark., 2024). Ayrıca üç fazlı PV sistemlerde evirici kontrolüne odaklanan çalışmalarda da evirici kontrolü için YSA öneren çalışmalar bulunmaktadır (Babaie ve ark., 2020; Singh ve ark., 2014).

Şebeke bağlantılı PV evirici sistemlerde kontrolcü olarak Model Öngörülü Kontrol (Model Predictive Control, MPC) kullanılan bazı çalışmalar mevcuttur (Bouaouaou ve ark., 2022; Cameron ve ark., 2020; Gopakumar ve Vijayakumari, 2017; Syed ve Raahemifar, 2015). MPC ile kontrol edilen evirici benzetiminden elde edilen veriler ile eğitilen YSA yapısına MPC tabanlı YSA denmektedir. MPC tabanlı YSA yapıları genellikle MPPT kontrolü için kullanılmaktadır (Khan ve ark., 2021).

Bu çalışmada ise diğer çalışmalardan farklı olarak bir öngörücü kullanılarak şebekenin faz açısı iki kontrol adımı öncesinden öngörülmüştür. Bu öngörü akım referansında kullanılarak donanım ve yazılım kaynaklı gecikmeler tolere edilmiştir. Daha sonra işlemcinin işlem yükünün azaltılması için oluşturulan kontrol yapısı tek bir YSA'ya dönüştürülmüş ve referans akım öngörülü bir YSA oluşturulmuştur. Bunun için ilk olarak Matlab/Simulink ortamında şebeke bağlantılı tek aşamalı iki seviyeli bir PV evirici sistemi oluşturulmuştur. Sistemde akım kontrolcüsü olarak, klasik PI akım kontrolcüsü ve tasarlanan PI tabanlı Referans Öngörülü YSA (PI-based Predictive Neural Network, PI-PNN) akım kontrolcüsü yöntemleri kullanılmıştır. Bu iki yöntemden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Tasarlanması amaçlanan PI-PNN akım kontrolcüsü yapısının eğitim verilerinin elde edilmesi amacı ile ilk olarak sinüzoidal bir sinyalin iki adım ($100\mu s$) sonrasını öngören başka bir YSA yapısı olan Referans Akım Öngörücü YSA (Reference Predictive Neural Network, RefPNN) yapı geliştirilmiştir. Daha sonra hazırlanan benzetimde elde MPPT çıkışında elde edilen referans evirici akımı önce bu RefPNN yapısına uygulanmıştır. RefPNN çıkışı olan öngörülen akım referansı PI akım kontrolcüsüne girilerek evirici kontrolü gerçekleştirilmiştir. Matlab/Simulink ortamında hazırlanan bu benzetim ile tasarlanması amaçlanan PI-PNN akım kontrolcüsü için gerekli eğitim verileri üretilmiştir. Tasarlanan PI-PNN akım kontrolcüsü, PV sisteminin kontrolünde test edilmiş ve bu yöntemin klasik PI yöntemine göre daha verimli çalıştığı görülmüştür. Ayrıca, elde edilen

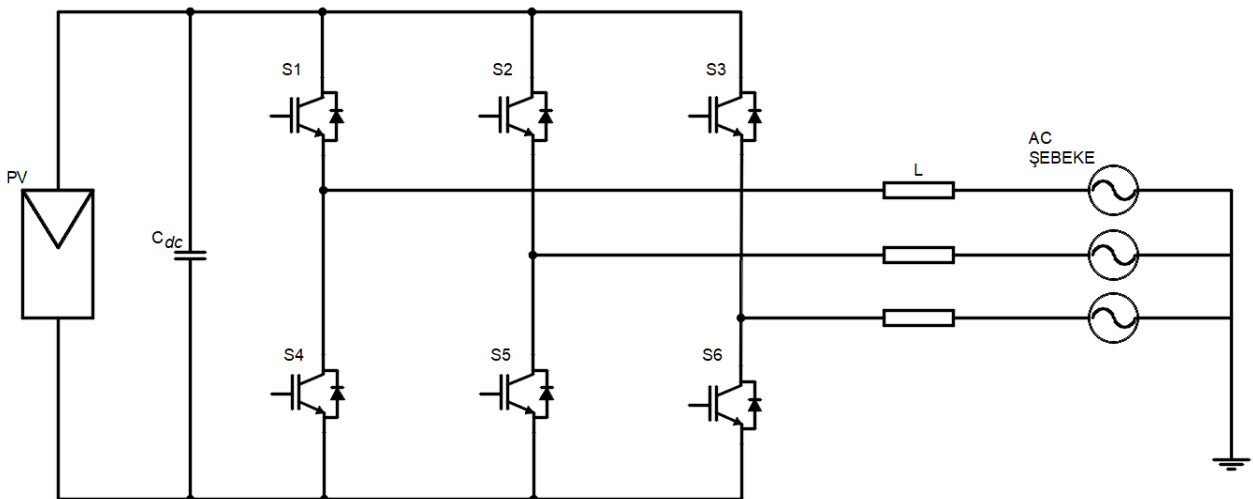
öngörülü özelliğine sahip bu YSA yapısının sistemdeki değişikliklere daha iyi tepki ürettiği ve herhangi parametre ayarlanması gerekmeden uygulanabileceği tespit edilmiştir.

İkinci bölümünde üç fazlı şebeke bağlantılı PV sistem ve kontrol yapısı sunulmuştur. Üçüncü bölümde gerçekleştirilen benzetim çalışması ile önerilen YSA ve eğitimi detaylı bir şekilde anlatılmış. Ayrıca bu bölümde benzetim sonuçları verilerek karşılaştırılmıştır. Dördüncü bölümde benzetim ve deneysel sonuçlar karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. Son bölümde ise elde edilen veriler karşılaştırılarak sunulmuştur.

2. ÜÇ FAZLI ŞEBEKE BAĞLANTILI FOTOVOLTAİK EVİRİCİLER

PV paneller güneş enerjisini DC elektrik enerjisine dönüştürmektedir (Vardar ve ark., 2018). PV paneller tarafından üretilen DC enerjinin, AC şebekeye aktarılması için DC enerjinin AC'ye dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu dönüşüm için bir güç elektroniği devresi olan eviriciler kullanılmaktadır. PV sistemlerde eviricilerin iki ana görevi vardır. Bunlar PV panellerden maksimum gücün çekilmesi ve DC gücün AC güce dönüşümüdür. Güç dönüşümü yapılırken enerjinin şebekeye aktarılması için şebeke ile senkronizasyon sağlanması gerekmektedir. Bu sebeplerden dolayı şebeke bağlantılı PV sistemlerin en önemli parçalardan biri eviricilerdir (Blaabjerg ve ark., 2004; Hassaine ve ark., 2009; Jana ve ark., 2017). İki aşamalı PV sistemlerde, MPPT kısmının gerçekleştirildiği ilk aşama için bir DC-DC güç devresi kullanılırken, DC gücün AC güce dönüştürülerek şebekeye aktarıldığı ikinci aşama için ise evirici güç devresi kullanılmaktadır.

Tüm bu işlemler tek bir güç devresi kullanılarak gerçekleştirildiği durum için tek aşamalı terimi kullanılmaktadır. Endüstride en yaygın kullanılan evirici türlerinden biri iki seviyeli voltaj kaynaklı eviricilerdir (Two Level Voltage Source Inverter, 2L-VSI). Üç fazlı şebeke bağlantılı tek aşamalı 2L-VSI devre şeması Şekil 1'de verilmiştir. Yapıda her faz çıkışı için bir faz kolu ve her kolun pozitif (P) ve negatif (N) baralara olan bağlantılarını kontrol eden anahtarlar bulunmaktadır (Leon ve ark., 2016; Rivera ve ark., 2015).



Şekil 1. Üç fazlı şebeke bağlantılı tek aşamalı PV evirici sistemi devre şeması

2L-VSI eviricilerde, invertörün 6 anahtarını (S1, S2, S3, S4, S5 ve S6) kontrol etmek için üç kontrol pozisyonu yeterlidir. Bu üç pozisyon Sa, Sb ve Sc ile temsil ediyorsa, bunların tümleyenleri da Sa', Sb' ve Sc' olarak tanımlanarak kullanılabilir.

$$S_a = \begin{cases} 1; & S1 = on \quad \text{ve} \quad S4 = off \\ 0; & S1 = off \quad \text{ve} \quad S4 = on \end{cases}$$

$$S_b = \begin{cases} 1; & S2 = on \quad \text{ve} \quad S5 = off \\ 0; & S2 = off \quad \text{ve} \quad S5 = on \end{cases}$$

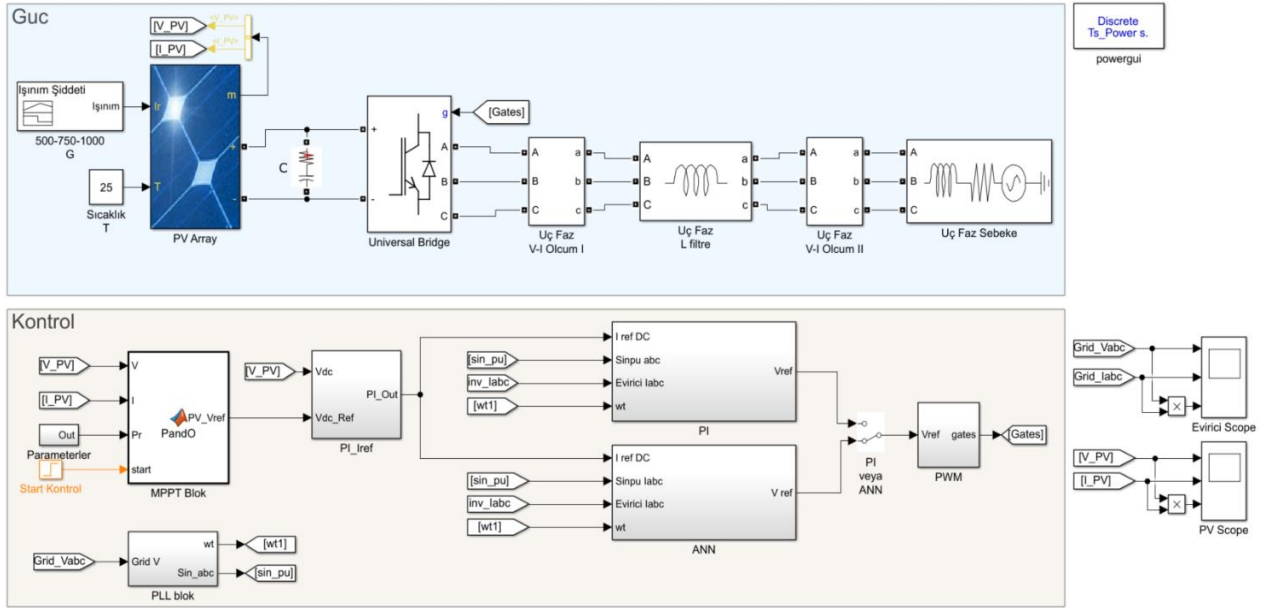
$$S_c = \begin{cases} 1; & S3 = on \quad \text{ve} \quad S6 = off \\ 0; & S3 = off \quad \text{ve} \quad S6 = on \end{cases}$$

PV panellerin çıkışında üretilen DC gerilimin evirici girişine iletilmesi için genellikle bir DC bara hattı kullanılmaktadır. DC bara üzerine kondansatör (C_{dc}) konularak DC bara gerilimi dengelenir ve bu hattaki dalgalanmalar bastırılır. Evirici güç devresi ile DC bara hattı gerilimi ve evirici çıkış akımı kontrol edilir. Evirici çıkışında filtre kullanılarak evirici çıkış akımı filtrelenir ve şebekeye bağlanmadan önce sinüzoidal sinyale dönüştürülür. PV panellerden çekilen güç, güneş ışığı yoğunluğuna bağlı olarak değişmektedir. Ayrıca V-I karakteristik eğrileri lineer olmadığı için verdikleri güç, panellerden çekilen akıma göre de değişmektedir. Bu yüzden anlık olarak panellerden çekilecek maksimum güç değişebilmektedir. Panellerden en yüksek verimi almak için maksimum güç noktasının (Maximum Power Point, MPP) tespit edilerek panellerden en uygun akımın çekilmesi ve panellerin en uygun gerilim değerinde tutulması gerekmektedir. Bunun için geliştirilmiş çeşitli MPPT algoritmaları bulunmaktadır (Gupta ve Saxena, 2016; Selvan ve ark., 2016). Bu algoritmalar arasında en çok bilinen ve kullanım kolaylığı nedeniyle sıklıkla tercih edilen algoritmalarından biri hata-gözlem (Perturb and Observation-P&O) algoritmasıdır (Çınar ve ark., 2022). MPPT algoritması kullanılarak DC bara referans gerilimi üretilmektedir. Üretilen DC bara referans gerilimi ile DC bara gerilimi arasındaki hata değeri (e_{dc}) bir PI kontrolcüsü tarafından değerlendirilerek evirici referans akım değerini üretir. Sinüzoidal olamayan DC bara kontrolü için genellikle PI kontrolcüsü tercih edilmektedir.

Şebeke bağlantılı PV sistemlerin şebekeye entegrasyonu için Faz Kilitleme Döngüsü (Phase-Locked Loop, PLL) kullanılarak şebekenin faz açısı izlenir. Bu şebeke faz açısı kullanılarak birim sinüs sinyalleri üretilir. Birim sinüs sinyalleri ile DC bara kontrolcüsü (PI) çıkışında üretilen referans akım genlik çarpılarak evirici referans akımı elde edilir (Ciobotaru ve ark., 2006). Üç fazlı uygulamalarda PLL olarak sıklıkla Senkron Dönen Referans Çerçeve PLL (SRF-PLL) yöntemi kullanılmaktadır (Panigrahi ve ark., 2018; Yağan ve ark., 2018). Bu çalışmada PLL olarak SRF-PLL yöntemi tercih edilmiştir.

3. KLASİK VE YSA TABANLI AKIM KONTROLCÜLERİN BENZETİMİ

Matlab/Simulink ortamında oluşturulan şebeke bağlantılı tek aşamalı PV evirici sistemi benzetimi Şekil 2'de verilmiştir. Benzetimin örnekleme zamanı, güç katlarının fiziksel bir sisteme daha yakın olması için 0.5 μs olarak ayarlanmıştır. Ayrıca, kontrol sisteminin gerçek bir sistem ile benzer çalışma şartları altında tepkisini gözlemlemek için MPPT bloğunun örnekleme zamanı 50 μs ve diğer kontrol bloklarının örnekleme süresi 500 μs olarak ayarlanmıştır.



Şekil 2. Gerçekleştirilen üç fazlı şebeke bağlantılı tek aşamalı PV evirici Matlab benzetimi

Oluşturulan benzetimde güneş panelleri dizisi için Matlab/Simulink kütüphanesinde bulunan PV Array (PV Dizisi) bloğu kullanılmıştır. PV Dizi bloğu, tek bir kolda 13 tane seri bağlı SunPower SPR-305_WHT güneş panelinden oluşturulmuştur. Bu şekilde PV Dizi bloğu MPP noktasında 3968W maksimum güç üretmektedir. DC bara dalgalanmalarının azaltılması için DC baraya bir kondansatör eklenmiştir. Gerçek bir sistemde, başlangıç aşamasında PV panellerde ve kondansatörde gerilim olacağı için kondansatör başlangıç voltajı 750V olarak ayarlanmıştır. Evirici çıkışında L filtre kullanılarak şebeke bağlantısı bu filtre üzerinden gerçekleştirilmiştir. Şebeke bağlantılı PV evirici sistem benzetiminde kullanılan güç devrelerine ait parametreler Çizelge 1’de verilmiştir.

Çizelge 1. Şebeke bağlantılı PV evirici devre parametreleri

Devre	Değeri	Birimi
Paralel Dizi Sayısı	1	-
Dizi Başına Seri Bağlı Modül Sayısı	13	-
Panel Açık Devre Gerilimi, Voc	64.2	V
Panel Kısa Devre Akımı, Isc	5.96	A
Panel MPP Gerilimi, Vmp	54.7	V
Panel MPP Akımı, Imp	5.58	A
Toplam PV Gücü	3968	W
DC Bara Kondansatörü	330	μ F
L Filtre	6	mH
Şebeke Gerilimi	220	V
Şebeke Frekansı	50	Hz

MPPT bloğu, bir Matlab fonksiyonu bloğu kullanılarak hata gözlem algoritmasının kodlanması ile oluşturulmuştur. Bu blok tarafından üretilen PV panel referans gerilim değeri, aynı zamanda evirici girişi için DC bara referans gerilim değeridir. MPPT bloğu tarafından üretilen DC bara referans gerilim değeri PI_Iref bloğuna uygulanmaktadır. PI_Iref bloğunun çıkışı ise eviricinin akım referans genlik değeridir. PLL bloğu kullanılarak PV sistem için gerekli olan şebeke faz açısı bilgisi ve bu faz açısı değeri kullanılarak oluşturulan 3 fazlı birim sinüs sinyalleri üretilmektedir. PI_Iref bloğunun

çıkışında üretilen bu akım genlik bilgisi, klasik PI kontrol yöntemli benzetim için PI alt bloğunda ve önerilen PI-PNN kontrol yöntemli benzetim için ANN alt bloğunda kullanılmaktadır.

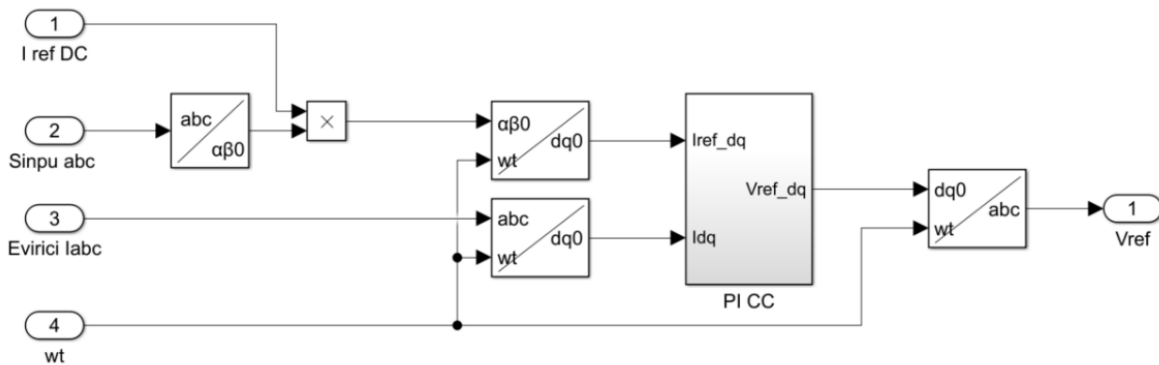
PLL bloğu içerisinde Matlab/Simulink kütüphanesinde bulunan PLL(3ph) bloğu ile Matlab Function1 isimli fonksiyon bloğu kullanılmıştır. PLL(3ph) bloğu, şebeke faz açısını (ωt) izlemektedir. PLL(3ph) bloğu ile bulunan faz açısı (ωt), Matlab Function1 bloğuna girilerek 3 faz birim sinüs sinyalleri üretilmektedir. Benzetimde VSI yapısını oluşturmak için H-köprü yapısına sahip Universal Bridge bloğu kullanılmıştır. Bloкта anahtarlama güç elemanı olarak diyotlu IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) kullanılmıştır. Bu yapıda, 6 adet IGBT kullanılarak DC bara gerilimi AC gerilime dönüştürülmektedir. PWM bloğunda, kontrolcüler tarafından üretilen V_{ref} bilgisi 20kHz'lik bir üçgen dalga ile karşılaştırılarak IGBT anahtarlama sinyalleri üretilmektedir. Benzetimde, PI bloğu ve ANN bloğu tarafından üretilen kontrol sinyallerinden hangisinin eviriciyi kontrol edeceği “PIveyaANN” isimli anahtar vasıtasıyla seçilmektedir. Böylece tek benzetimde herhangi farklılık olmadan iki kontrolcüden hangisinin kontrol edeceği değiştirilebilmektedir.

3.1 PI Akım Kontrolcüsü Kullanılan Benzetim

Matlab/Simulink ortamında oluşturulan PV evirici sisteminin kontrolünde yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biri olan klasik PI akım kontrol yöntemi kullanılmıştır. Klasik PI kontrol yöntemi, doğrusal kontrolcüler sınıfında, uygulanması basit ve kullanımı kolay olan bir yöntemdir. Sinüzoidal referans takibinde PI kontrol yöntemi kullanıldığında, sistemde sabit durum hatası (steady-state error) oluşmakta ve küçük bozulmalara karşı zayıf tepki vermektedir. Bu yüzden PI kontrol yöntemi, eviricilerde kullanılırken genellikle abc-dq eksen dönüşümü yapılarak kullanılmaktadır (Ciobotaru ve ark., 2006). PI transfer fonksiyonu $G_{PI}(s)$ Eşitlik 1. de verilmiştir. Denklemden K_p oransal kazancı, K_i ise integratör kazancını temsil etmektedir.

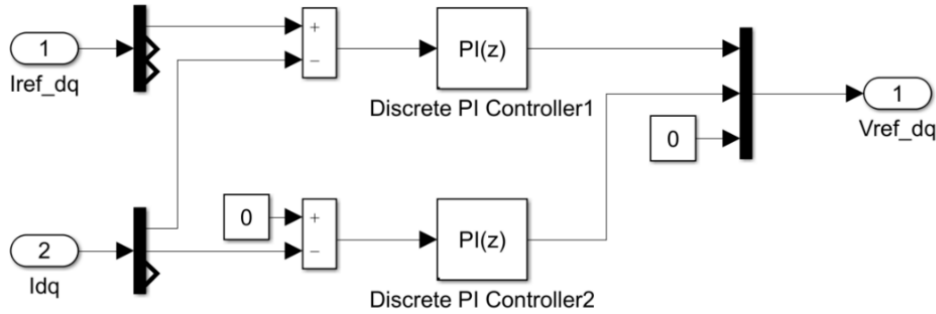
$$G_{PI}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (1)$$

Klasik PI akım kontrol yöntemi, benzetimde PI alt bloğu içerisinde modellenmiştir. Şekil 3’de yapısı verilen PI alt bloğunun dört adet girişi bulunmaktadır. Bunlar, eviriciden şebekeye aktarılan anlık gerçek akım bilgisi (*Evirici Iabc*), akım genlik referans bilgisi (*Iref*), PLL bloğu tarafından üretilen şebeke faz açısı (ωt) ve faz açısı bilgisi kullanılarak üretilen birim sinüs sinyalleridir. (*Sinpu abc*). Bu blokta, *Iref* ile *Sinpu abc* çarpılarak referans akım sinyali üretilmektedir. Elde edilen referans akım sinyali dq0 eksenine dönüştürülerek PI akım kontrolcüsü (PI CC) bloğuna girilmektedir. Yine bu bloğa aynı zamanda, evirici akımları da abc ekseninde dq0 eksenine dönüşümü yapılarak uygulanmaktadır.



Şekil 3. Klasik PI akım kontrolcüsü benzetiminde kullanılan “PI” alt bloğu içyapısı

Şekil 4'te iç yapısı verilen PI CC bloğunda, d ve q eksenleri için iki adet klasik PI kontrolcüsü kullanılarak dq0 eksenlerinde kontrol çıkış sinyali (V_{ref_dq}) üretilir. PI bloklarından ilki d eksen için kullanılmaktadır. “Discrete PI Controller1” bloğu girişine, I_d akım bilgisi ile I_{ref_d} akım referans bilgisinin farkı alınarak girilmektedir. Uygulamamızda Q eksen için referans girişine sıfır girilmiştir. Reaktif güç talebi olduğu durumda bu değer değiştirilebilir.

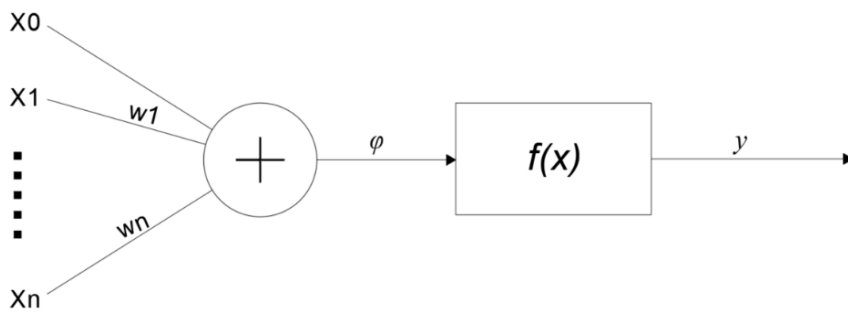


Şekil 4. “PI” alt bloğu içerisinde bulunan “PI CC” alt bloğunun iç yapısı

PI CC alt bloğunun çıkışı olan dq0 eksenindeki referans gerilimler sonrasında abc eksenine döndürülerek PWM alt bloğuna uygulanmaktadır. Burada 20kHz’lik testere dişi sinyal ile karşılaştırılarak IGBT’ler için gerekli anahtarlama sinyalleri elde edilmektedir.

3.2 YSA Tabanlı Öngörülü Akım Kontrolcüsü Tasarımı ve Benzetimi

YSA’lar biyolojik sinir ağlarının çalışma prensibine benzetilerek geliştirilen, modern kontrol teknikleri arasında yerini almış bir yapay zeka modelleme tekniğidir. Geçmiş giriş-çıkış verilerini kullanarak, giriş-çıkış arasındaki ilişkileri öğrenme, bu ilişkileri modelleme ve optimize etme yeteneğine sahiptir. YSA’ların güvenilirliği farklı alanlarda yapılan çeşitli çalışmalarda uygulanmış ve kanıtlanmıştır. Çeşitli mimariler arasında ileri beslemeli YSA’lar öne çıkmaktadır. İleri beslemeli ağlar, katmanlar halinde statik bir yapıdadır (I. S. Mohamed ve ark., 2019; Rivera ve ark., 2015). Birden çok nöronun birlikte kullanılmasıyla YSA’lar oluşur. İleri beslemeli çok girişli tek nöronun yapısı Şekil 5’te verilmiştir.



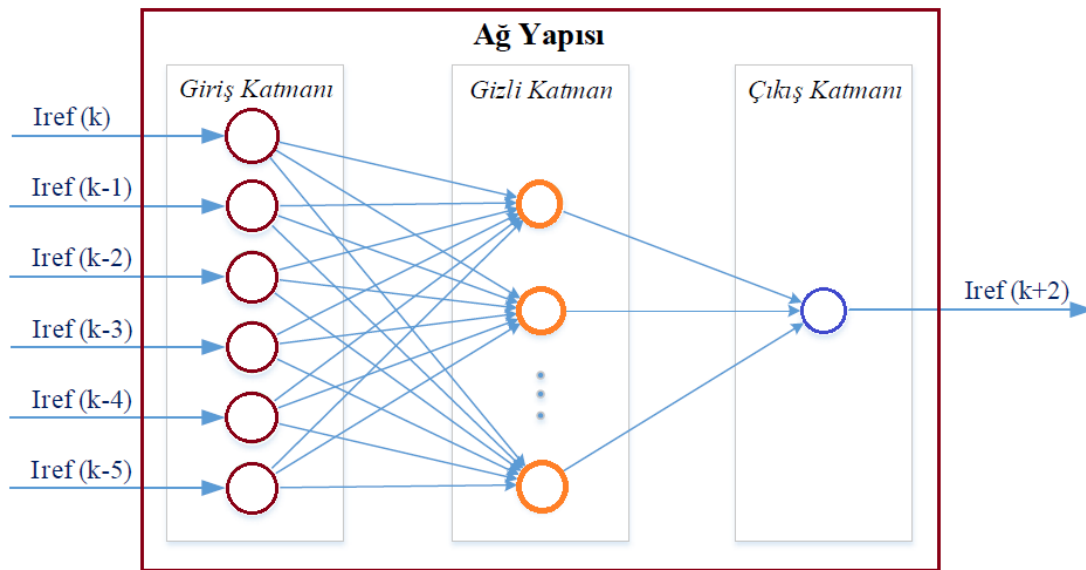
Şekil 5. Tek katmanlı tek nöronlu ileri beslemeli YSA yapısı

Burada; y nöron çıkışını, $f(x)$ aktivasyon fonksiyonu, ϕ toplam çıkış sinyalini, w_0 sapma (bias) w_1 ’den w_n ’e kadar ağırlıklandırmalar ve X_1 ’den X_n ’e kadar girişleri ifade etmektedir.

Bu çalışmada öncelikle, YSA tabanlı öngörülü (PI-PNN) bir akım kontrolcüsü gerçekleştirebilmek ve bu ağın eğitim verilerinin elde edilebilmesi için ayrı bir YSA ağı tasarlanmıştır. Bu ağ ile sinüzoidal referans akımın, iki örnekleme adımı öncesinden (100µs) tahmin edilmesi amaçlanmıştır. Ağın eğitimi için birim sinüs dalgası kullanılmıştır. İki örnekleme adımı

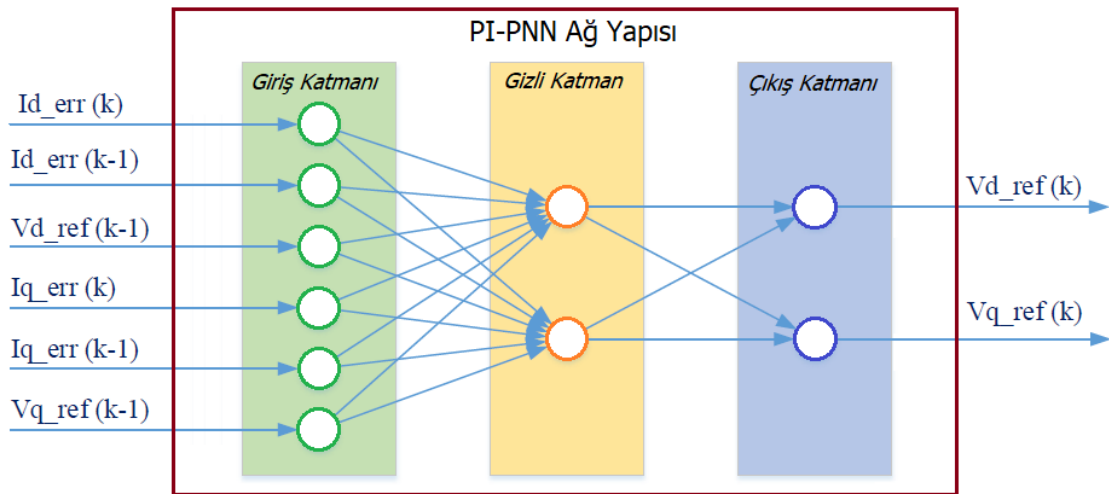
([k+2]) sonrasına ait referans akım değerini tahmin edebilen referans akım öngörücü YSA (RefPNN) Matlab/Simulink ortamında tasarlanmıştır. Benzetimde iki adım sonrasının $100\mu s$ olması için, YSA bloğunun örnekleme zamanı $50\mu s$ olarak ayarlanmıştır. Tasarlanan ağın eğitilmesi için gerekli veriler bu benzetimden alınmıştır. Ağın girişi olarak, 50 Hz frekansında üretilen birim sinüs sinyalinin mevcut değeri ile beş geçmiş değeri kullanılmıştır. Ağın çıkışı ise mevcut örnekten iki örnekleme zamanı sonrasına ait veridir. Sinüzoidal giriş referansın farklı değerleri için (anlık zaman değeri kaydırılarak) yukarıdaki giriş ve çıkış eğitim verileri oluşturulmuş ve kaydedilmiştir. Ağ, Levenberg-Marquardt metodu ile eğitilmiştir. Eğitilen RefPNN, bir gizli katmanında 10 adet nöron bulunan ileri beslemeli bir YSA'dan oluşturulmuştur (Şekil 6). Gizli katmanda transfer fonksiyonu olarak hyperbolic tanjant sigmoid (tansig) fonksiyonu kullanılmıştır. Ağın çıkış katmanında ise bir adet nöron ve doğrusal aktivasyon fonksiyonu kullanılmıştır.

Tasarlanması amaçlanan PI-PNN akım kontrolcüsünün eğitim verilerini elde edilmesi için ikinci aşama, RefPNN ve klasik PI akım kontrolcüsünün birlikte simüle edilmesidir. Evirici kontrol yapısına öngörü özelliği katma amacı ile tasarlanan RefPNN yapısı sinüzoidal giriş sinyali alması gereksiniminden dolayı referans akımın girişi α - β eksenlerinde kullanılmış olup çıkışında üretilen öngörölmüş referans akımı PI akım kontrolcüsüne uygulanacağından, öncesinde dq0 eksenine dönüştürülmektedir. dq eksenlerine dönüşümü gerçekleştirilen öngörölmüş referans akım, PI kontrolcüsünün girişine uygulanmış ve böylelikle oluşturulan RefPNN ve PI akım kontrolcüsü içeren Matlab/Simulink benzetimi ile PI-PNN akım kontrolcüsünün eğitimi için gerekli eğitim seti verileri elde edilmiştir. Eğitim verileri için RefPNN ve PI kontrol algoritmalarının örnekleme adım aralığı $50\mu s$ olarak ayarlanmış ve her bir giriş-çıkış için 1200 adetlik veri dizisi alınmıştır.



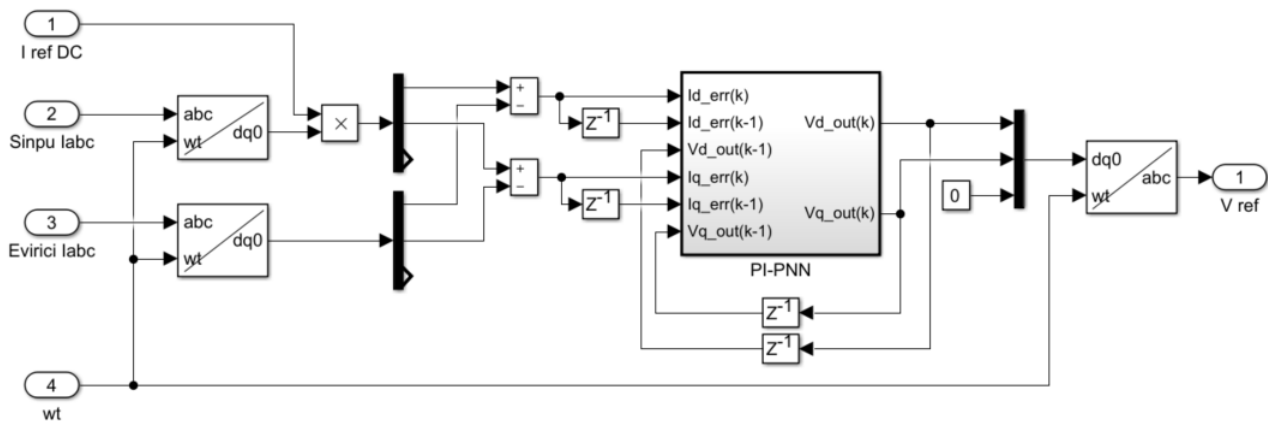
Şekil 6. İleri beslemeli RefPNN ağ yapısı

Son aşamada, bu veriler kullanılarak PI-PNN akım kontrolcüsünün tasarımı ve eğitimi gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan PI-PNN ağı için girişler, dq0 ekseninde akım hataları ($I_{d_err}[k]$ ve $I_{q_err}[k]$), bir önceki akım hataları ($I_{d_err}[k-1]$ ve $I_{q_err}[k-1]$) ve PI CC'nin bir önceki çıkışı ($V_{d_out}[k-1]$ ve $V_{q_out}[k-1]$) verileridir. Ağ çıkışı için ise dq0 ekseninde PI CC çıkışı ($V_{d_out}[k]$ ve $V_{q_out}[k]$) verileri kullanılmıştır. Elde edilen veriler ile 6 giriş, 2 çıkış ve 1 gizli katmana sahip dinamik bir ağ yapısı oluşturulmuştur. Şekil 7'de tasarlanan geri beslemeli ağ yapısı verilmiştir.



Şekil 7. Geri beslemeli PI-PNN akım kontrolcüsü ağ yapısı

Ağ yapısı oluşturulurken ağda minimum nöron kullanımı amaçlanmıştır ve gizli katmanda 2 adet nöron kullanılmıştır. Aktivasyon fonksiyonu olarak gizli katmanda tansig, çıkış katmanında ise linear (pureline) fonksiyonu kullanılmıştır. Ağın eğitimi, Levenberg-Marquardt geri yayılım (backpropagation) yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 2’de verilen genel benzetimde görülen, tasarlanan PI-PNN’ün kullanıldığı durumdaki “ANN alt bloğu” içyapısı Şekil 8’de verilmiştir.



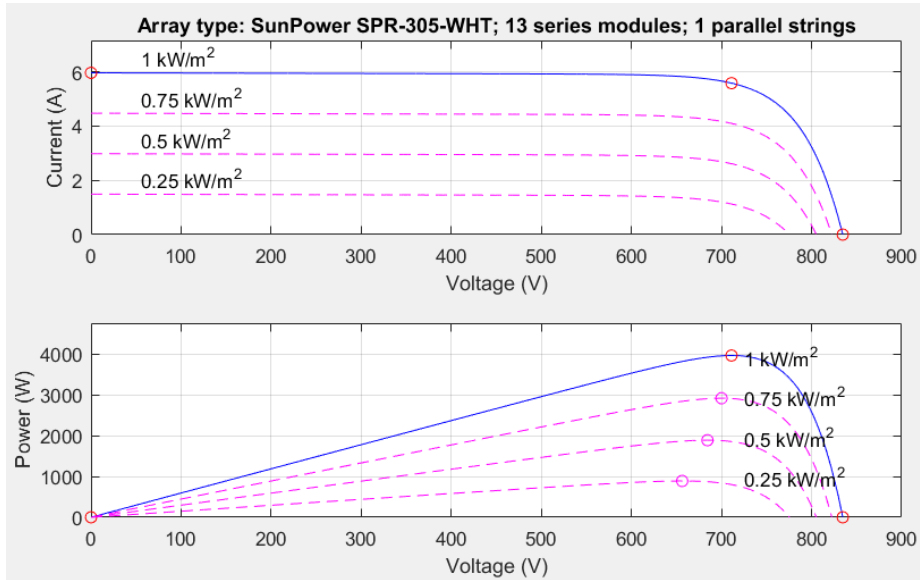
Şekil 8. PI-PNN akım kontrolcüsü benzetiminde kullanılan “ANN alt bloğu” içyapısı

İlk olarak blokta, sinüzoidal dalga olan birim sinüs ($\sin u_{abc}$) ile Evirici çıkış akımı (Evirici i_{abc}) $dq0$ eksenlerine dönüştürülmüştür. Bu dönüşüm için şebeke faz açısı kullanılmıştır. Birim sinüs ile DC akım referansı çarpılarak dq eksenlerinde referans akım genliği oluşturulmuştur. Daha sonra referans akımdan, evirici akımı çıkartılarak dq ekseninde akım hataları elde edilmiştir. Bu akım hatalarının bir önceki değeri de PI-PNN bloğuna girilmiştir. Blok çıkış değerlerinin (V_{d_out} ve V_{q_out}) bir öndeki değerleri de yine giriş için geri beslenmiştir. Son olarak çıkışta, $dq0$ eksenlerinde elde edilen referans gerilim abc eksenlerine dönüştürülerek blok çıkışına gönderilmiştir.

3.3 Benzetim Sonuçları ve Karşılaştırmalar

Bu bölümde, üç faz şebeke bağlantılı PV evirici sisteminin Matlab/Simulink ortamında gerçekleştirilen benzetim çalışması sonuçları verilmiştir. Önceki bölümlerde detayları sunulan klasik PI ve YSA tabanlı iki farklı akım kontrolcüsü kullanan sistemin benzetim sonuçları bu bölümde

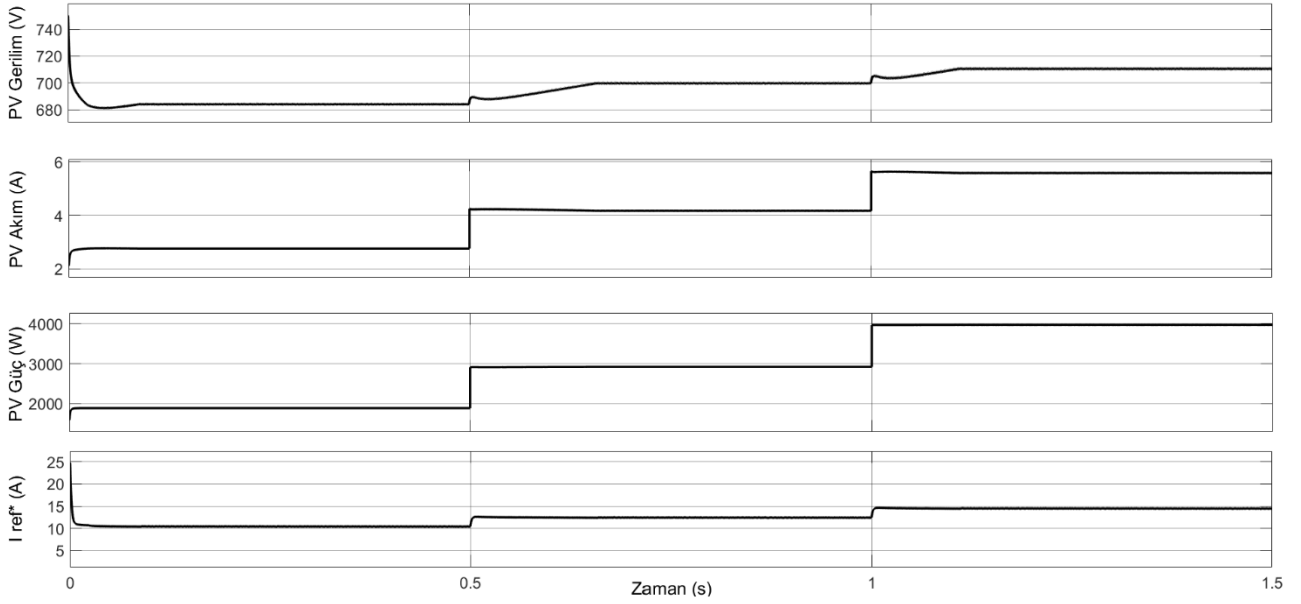
verilerek karşılaştırılmıştır. Her iki kontrol yöntemi de Şekil 2’de verilen tek bir benzetimde sırayla gerçekleştirilmiştir. Benzetimde, PV dizisi için güneş ışınım şiddeti 0-0.5s arası 500W/m^2 , 0.5-1s arası 750W/m^2 ve 1-1.5s arası 1000W/m^2 olarak ayarlanmıştır. Grafiklerdeki güç değerleri, gerilim değeri ile akım değeri çarpılarak elde edilmiştir. Kondansatörün başlangıç anındaki voltaj değeri PV dizisinin çıkışında voltaj olacağı için 750V olarak ayarlanmıştır. PV dizisinin karakteristik akım-gerilim ve güç-akım grafiği Şekil 9’da verilmiştir.



Şekil 9. PV panel dizisinin MPP noktalarına ait akım-gerilim ve güç-gerilim grafikleri

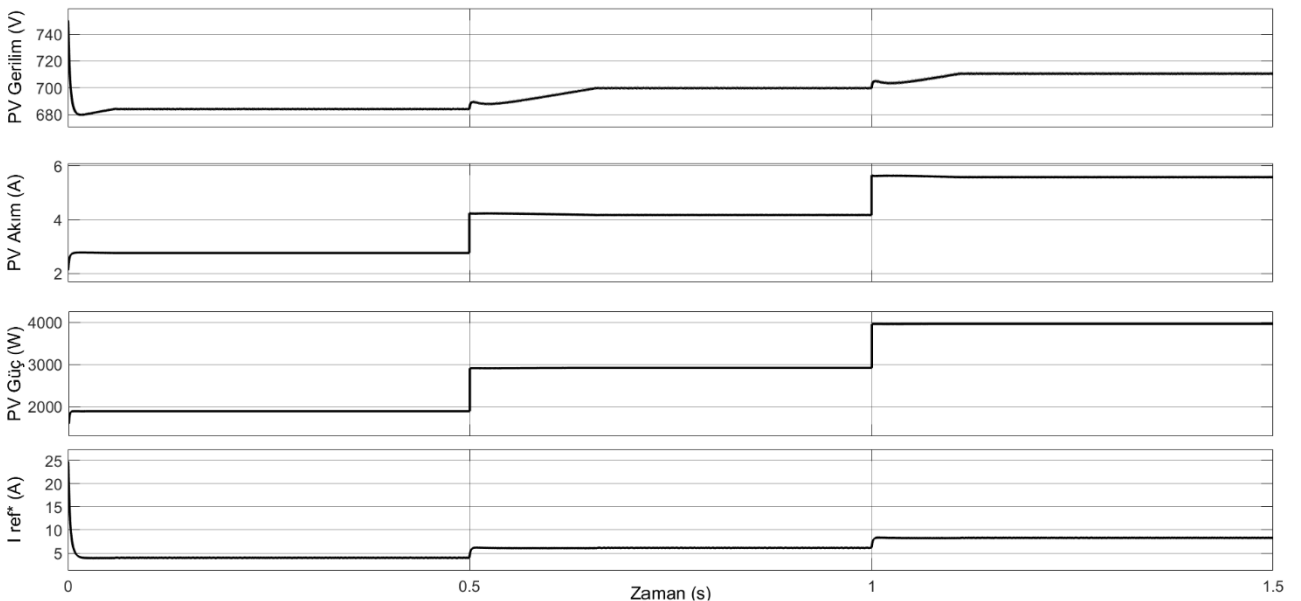
Grafikte MPP noktaları Matlab/simulink programı tarafından otomatik olarak işaretlenmiştir. Bu noktalar incelendiğinde panellere 1kW/m^2 ışınım şiddeti uygulandığında, panellerden çekilebilecek 3968W maksimum güç için panel gerilimi 711.1V olmalıdır. Panellere 750W/m^2 ışınım şiddeti uygulandığında 2920W maksimum güç 700.1V ’ta elde edilmektedir ve panellere 500W/m^2 ışınım şiddeti uygulandığında panellerden 1890W ’lık maksimum güç 684.4V ’ta elde edilmektedir.

PI akım kontrolcüsü kullanılarak yapılan evirici sistem benzetimde, PV panel çıkışına ait gerilim, akım ve güç grafikleri ile evirici akım referansına ait grafik Şekil 10’da verilmiştir. Grafikte üstten alta doğru sırayla PV panellerde oluşan gerilim, panellerden çekilen akım, elde edilen güç ve evirici referans akımı verilmektedir. PV gerilim grafiği incelendiğinde, gerilimin kondansatör başlangıç değeri olan 750V ’tan MPP noktası değeri 684.4V ’a 0.094s ’de ulaştığı görülmektedir. Işınım değişimlerinde ise sırasıyla 0.665 ’inci saniyede 700V ’a ve 1.116 ’nci saniyede 711V ’a ulaşmaktadır. Güç grafiği incelendiğinde ise PV panellerden çekilen gücün maksimum güç değerine hızlı bir şekilde vardığı görülmektedir. Şekil 10’da en altta verilen akım referans grafiği MPPT bloğu çıkışında PI_Iref bloğu tarafından üretilen akım referansının grafiğidir. Bu grafik, klasik PI akım kontrolcüsü kullanımı esnasında PI kontrolcü için oluşan referans akım genlik grafiğidir.



Şekil 10. Klasik PI kontrolcüsü kullanılan benzetimde PV panel çıkışına ait gerilim, akım, güç ve referans akım grafiği

PI-PNN akım kontrolcüsü kullanılarak yapılan PV evirici benzetimde, PV panel çıkışını ait gerilim, akım ve güç grafikleri ile evirici referans akım grafiği Şekil 11’de verilmiştir. Grafikte üstten alta doğru sırayla PV panellerin gerilimi, panellerden çekilen akım, üretilen çekilen güç ve evirici referans gerilimi verilmektedir. PV gerilim grafiği incelendiğinde, 750V gerilim başlangıç değerinden MPP noktası gerilim değeri 684.4V’a 0.061s’de ulaşmıştır. Işınım değişimlerinde ise sırasıyla 0.661’inci saniyede 700V’a ve 1.111’inci saniyede de 711V’a ulaştığı görülmektedir. Bu değerlere göre PV evirici sistemin hızı, PI-PNN kontrolcüsü kullanıldığında klasik PI kontrolcüsü kullanıldığına göre çok az daha hızlıdır. Güç grafiği incelendiğinde akım ve gerilim değişimlerinin birbirini dengeleyerek, PV panellerden maksimum gücün çok hızlı bir şekilde çekildiği görülmektedir. Şekil 11’de en altta evirici için MPPT bloğu çıkışında PI_Iref bloğu tarafından üretilen akım referansına ait grafik verilmiştir. Bu grafik, PI-PNN akım kontrolcüsü kullanımı esnasında oluşan referans akımın genlik grafiğidir.

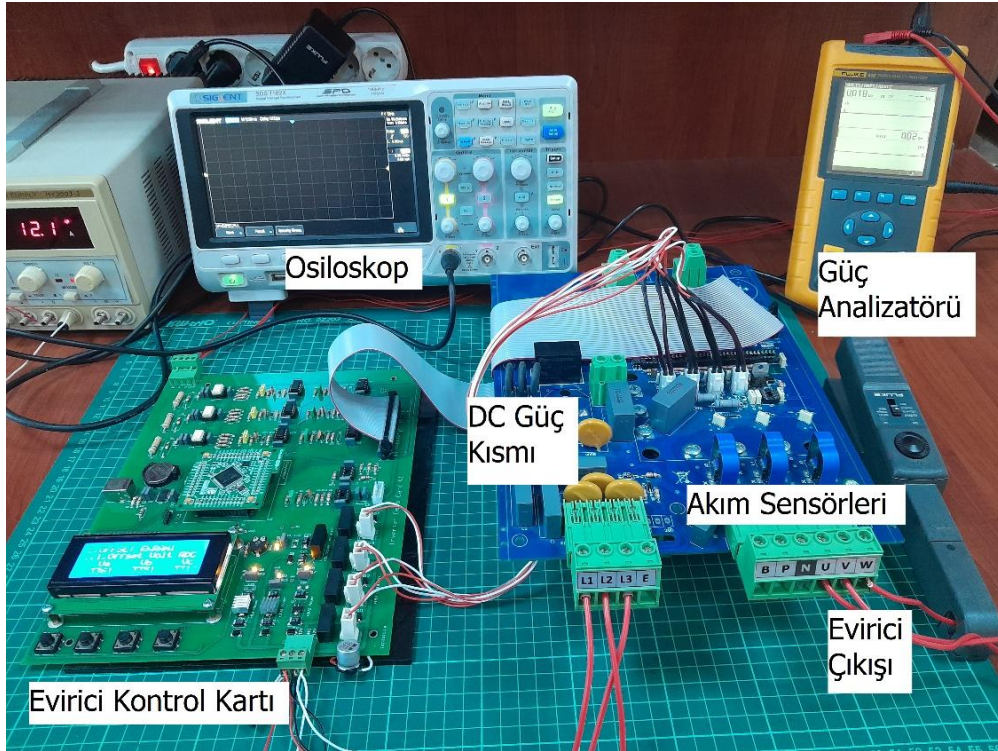


Şekil 11. PI-PNN kontrolcüsü kullanılan benzetimde PV panel çıkışına ait gerilim, akım, güç ve referans akım grafiği

Klasik PI akım kontrolcüsü ve önerilen PI-PNN akım kontrolcüsü yöntemlerinin uygulandığı PV evirici sisteminin benzetim grafikleri incelendiğinde, sonuçların genel olarak birbirine oldukça yakın olduğu fakat PI-PNN'ün değişimlere biraz daha hızlı tepki verdiği görülmektedir. Evirici akım grafiklerine göre sistemin ilk çalışmasında evirici çıkış akımının, PI-PNN'ün klasik PI yönteminden 30ms daha hızlı bir şekilde MPP değerine ulaştığı tespit edilmiştir. Bu değişim hızının farkı, PV gerilim grafiklerinde de fark edilmektedir. PI-PNN'ün daha hızlı ve stabil çalıştığı, akım referansının başlangıç ve ışıınım değişim anlarındaki ölçülen tepkisi ile tespit edilmiştir. Farklı çevre koşullarında ki çalışma beceresi için farklı ışıınım şiddeti değerleri kullanılarak test edilmiştir. PV panelleri etkileyen bir diğer çevre etkeni ise sıcaklıktır. Farklı sıcaklıklar için yapılan simülasyon testlerinde de önerilen YSA tabanlı kontrolcü aynı kontrol başarısını elde etmiştir.

4. BENZETİM VE DENEYSEL SONUÇLAR

Deneysel çalışmalar için tasarlanan üç fazlı 5 kVA'lık evirici güç kartında 7MBP50RJ120 1200V 50A IPM modül kullanılmıştır. Evirici çıkış akımlarının ölçümü LEM LA55-P hall sensörü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kontrol kartının şebeke gerilimi ile izolasyonu için HCPL 7840 entegresi tercih seçilmiştir. Evirici kartını kontrol etmek için STM32F407 mikrodenetleyicisi kullanılırken, kaynak kodların derlenmesi ve yüklenmesi için MikroC for ARM programı kullanılmıştır. Gerçekleştirilen uygulamada, PV paneller yerine güç kartında DC gerilime dönüştürülen şebeke gerilimi kullanılmıştır ve evirici çıkışı şebeke yerine RL yüke bağlanmış. Böylece DC besleme gerilimi ve çekilen akım sabitlenerek gerekli testler yapılmıştır. DC besleme gerilimi 210V olarak ayarlanmıştır. Filtre olarak 3mH'lik bobin ve rezistif yük olarak 10Ω 'luk direnç yük kullanılmıştır. Sabit yük ve sabit besleme geriliminde farklı akım referansları için evirici çıkış akımları üretilmiş ve evirici tepkisi kontrol edilmiştir. Deneysel çalışmalar için hazırlanan test düzeneğinin fotoğrafı Şekil 12'de verilmiştir.



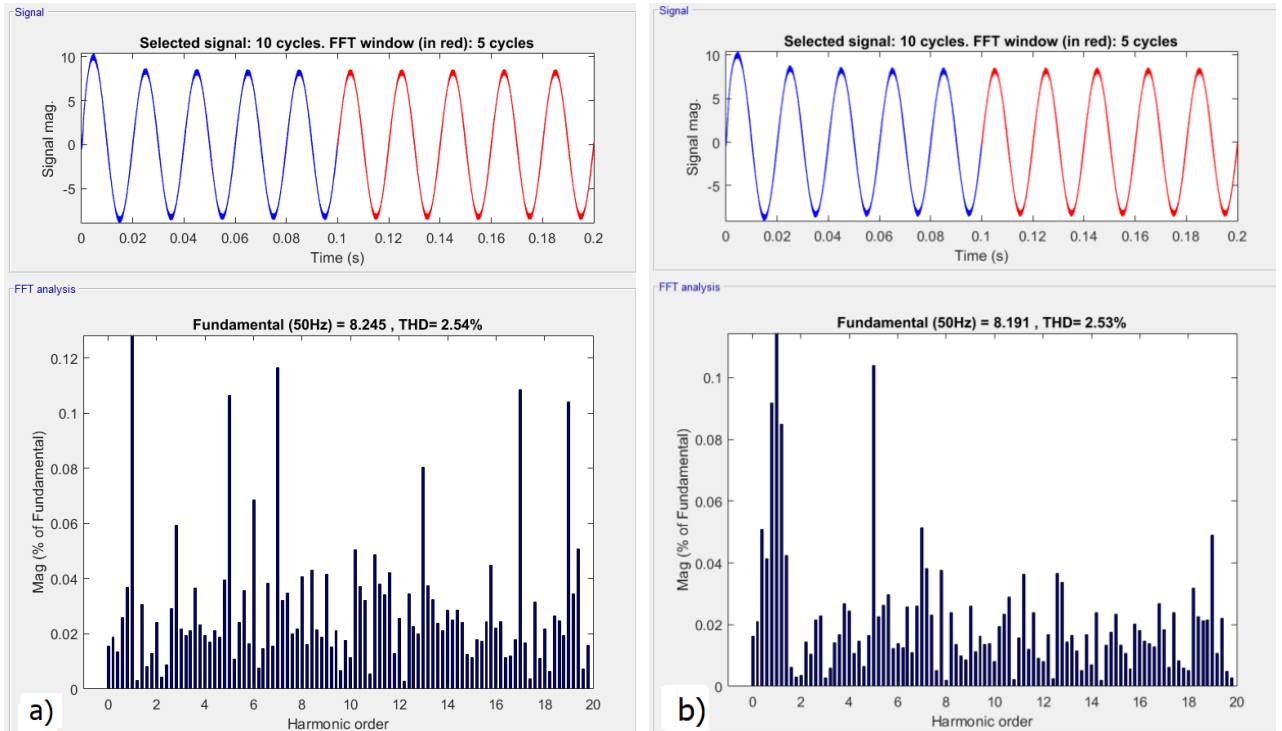
Şekil 12. Deneysel test düzeneği fotoğrafı

İlk olarak 2A ve 4A gibi düşük akım referans değerleri için akım evirici test edilmiştir. Daha sonra evirici referans akımları sırasıyla 2A, 5A ve 10A olarak ayarlanmıştır. Bu değerler, PV evirici sisteminde çekilecek akım değerlerini kapsayan değerlerdir. Osiloskop kullanılarak ölçülen evirici çıkış akım grafiği Şekil 13'te verilmiştir. Grafik incelendiğinde, referans akım değişimlerinin ve sürekli durumunun takibinin evirici tarafından başarılı bir şekilde gerçekleştirildiği görülmektedir.

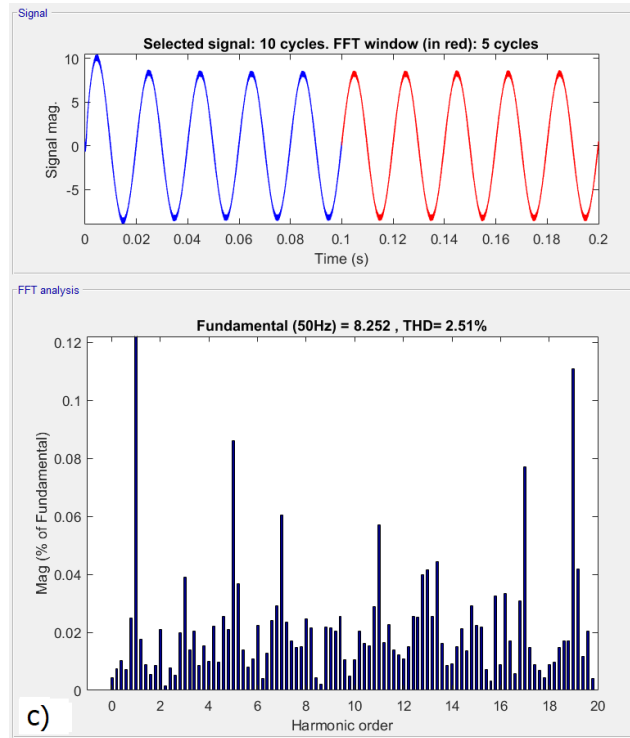


Şekil 13. Deneysel test sonuçları evirici çıkış akım grafikleri a)2A-4A b)2A-5A-10A

Deneysel çalışmalarda, toplam harmonik bozulma (Total Harmonic Distortion-THD) ölçümleri FLUKE 43B güç kalitesi analizör cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan ölçümler sonucunda, klasik PI akım kontrolcüsü yöntemi kullanılarak kontrol edilen evirici çıkış akımındaki THD %3.2 olurken, önerin YSA tabanlı öngörülü kontrolcü kullanılarak kontrol edilen evirici çıkış akımındaki THD değeri %2.4 olmuştur. Benzetim çalışmalarında, evirici çıkış akımlarında oluşan toplam harmonik bozulmaların görüldüğü FFT analiz ekranları Şekil 14'te verilmiştir. PV evirici benzetiminde analiz için $1000\text{W}/\text{m}^2$ ışıma şiddeti ve ikinci 5 periyotluk zaman dilimi kullanılmıştır.



Şekil 14. Benzetim sonuçlarına göre evirici çıkış akımlarının FFT analizi; a) PI akım kontrolcüsü kullanıldığında, b) RefPNN ile birlikte PI akım kontrolcüsü kullanıldığında, c) PI-PNN akım kontrolcüsü kullanıldığında



Şekil 14. Benzetim sonuçlarına göre evirici çıkış akımlarının FFT analizi; a) PI akım kontrolcüsü kullanıldığında, b) RefPNN ile birlikte PI akım kontrolcüsü kullanıldığında, c) PI-PNN akım kontrolcüsü kullanıldığında (devamı)

Benzetimde, klasik PI akım kontrolcüsü kullanılan yöntemde THD değeri %2.54 elde edilirken, RefPNN ve PI akım kontrolcüsü ile elde edilen THD değeri %2.53'tür. Önerilen YSA tabanlı PI-PNN akım kontrolcüsü kullanıldığında ise THD değeri %2.51 olmuştur. Hem benzetim hem de deneysel çalışmalarda, önerilen PI-PNN kontrolörü ile kontrol edilen evirici çıkış akımının, klasik PI kontrolörü ile kontrol edilen evirici çıkış akımına göre daha düşük harmonik bozulmalara sahip olduğu gözlemlenmiştir.

5. SONUÇ

Bu çalışmada, üç fazlı şebeke bağlantılı PV eviriciler için YSA tabanlı öngörülü akım kontrolcüsü tasarlanmıştır. Tasarlanan akım kontrolcüsü, referans akımın iki adım sonrasını öngörerek yazılım ve donanım kaynaklı gecikmelerin önüne geçmesi planlanmıştır. Bunun için ilk olarak benzetim ortamında, 2 adım sonrasını öngörebilen YSA tabanlı bir referans akım öngörücüsü oluşturulmuştur. Klasik PI akım kontrolcüsü kullanılarak, öngörülen referans akıma göre PV evirici sistemi kontrol edilmiştir. Daha sonra bu benzetim çalışmasından alınan veriler kullanılarak, önerilen YSA tabanlı öngörülü akım kontrolcüsü eğitilmiştir. Klasik PI ve önerilen PI-PNN olmak üzere iki farklı akım kontrolcüsü kullanılarak benzetim ve deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Yapılan benzetim çalışmasında, farklı güneş ışınlamı değerleri kullanılarak PV eviricinin tepkisi gözlemlenmiştir. Her iki kontrol sistemiyle de değişen ışınlamı şiddetleri altında PV kaynağından şebekeye güç transferi maksimum güç noktasında ve düşük THD değerleriyle sağlanmıştır. Yapılan benzetim çalışması sonucunda her ne kadar YSA tabanlı kontrolcünün performansının daha iyi olsa da sonuçların birbirine oldukça yakın olduğu gözlemlenmiştir.

Deneysel çalışmalara geçildiğinde ise elektriksel gürültünün ve fiziksel ortamda meydana gelen diğer bozucuların etkileriyle karşılaşılacaktır. Bu tür ortamlarda yüksek tolerans kabiliyeti sayesinde YSA'nın ön plana çıktığı görülmektedir. Yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar

karşılaştırıldığında, her iki yönteminde kullanılabilir olduğu ve önerilen öngörülü YSA'ın klasik PI kontrolcüsüne göre daha evirici akımında düşük harmonik bozulma değeri elde edildiği ve daha hızlı tepki süresine sahip olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, PI kontrol yönteminde kullanılacak parametrelerin ayarlanma zorunluluğu bulunurken, önerilen YSA tabanlı kontrol yönteminde herhangi bir parametre ayarı gerektirmemektedir. Sonuç olarak, önerilen YSA tabanlı akım kontrolcüsünün şebeke bağlantılı PV evirici sistemine başarılı bir şekilde uygulandığı ve harmonik bozulmaları azalttığı gözlemlenmiştir.

6. TEŞEKKÜR

Bu çalışma Süleyman YARIKKAYA'nın Doktora tezinden üretilmiştir.

7. ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazarlar, bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar.

8. YAZAR KATKISI

Bu çalışmada Kadir VARDAR çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesi, çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin yönetimi, veri analizi ve yorumlama, makale taslağının oluşturulması, fiktisel içeriğin eleştirel incelemesi, son onay ve tam sorumluluk konusunda, Süleyman YARIKKAYA çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin yönetimi, verilerinin toplanması, veri analizi ve yorumlama, son onay ve tam sorumluluk konusunda katkı sağlamıştır.

9. KAYNAKLAR

- Arulkumar K., Vijayakumar D., Palanisamy K., Recent advances and control techniques in grid connected PV system - A review. *International Journal of Renewable Energy Research* 6(3), 1037-1049, 2016. <https://doi.org/10.20508/ijrer.v6i3.4075.g6886>
- Babaie M., Sharifzadeh M., Mehrasa M., Chouinard G., Al-Haddad K., PV Panels Maximum Power Point Tracking based on ANN in Three-Phase Packed E-Cell Inverter. 2020 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), 854-859, 2020. <https://doi.org/10.1109/ICIT45562.2020.9067218>
- Blaabjerg F., Chen Z., Kjaer S. B., Power electronics as efficient interface in dispersed power generation systems. *IEEE Transactions on Power Electronics* 19(5), 1184-1194, 2004. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2004.833453>
- Bouaouaou H., Lalili D., Boudjerda N., Model predictive control and ANN-based MPPT for a multi-level grid-connected photovoltaic inverter. *Electrical Engineering* 104(3), 1229-1246, 2022. <https://doi.org/10.1007/s00202-021-01355-w>
- Boumaaraf H., Talha A., Bouhali O., A three-phase NPC grid-connected inverter for photovoltaic applications using neural network MPPT. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 49, 1171-1179, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.066>
- Cameron S., Ameen G., M. E., H., Aman O., Model Predictive Control of Grid Connected Solar PV Inverter. 2020 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), 1-6, 2020.

- Carrasco J. M., Franquelo L. G., Bialasiewicz J. T., Galvan E., PortilloGuisado R. C., Prats M. A. M., Leon J. I., Moreno-Alfonso N., Power-Electronic Systems for the Grid Integration of Renewable Energy Sources: A Survey. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 53(4), 1002-1016, 2006. <https://doi.org/10.1109/TIE.2006.878356>
- Ciobotaru M., Teodorescu R., Blaabjerg F., Control of single-stage single-phase PV inverter. *EPE Journal (European Power Electronics and Drives Journal)* 16(3), 20-26, 2006. <https://doi.org/10.1080/09398368.2006.11463624>
- Çınar S. M., Bakım S., Hocaoglu F. O., Designing a novel MPPT algorithm based on the extraterrestrial irradiance for photovoltaic energy generation systems and testing under partial shade conditions. *Journal of Computational Electronics* 21(4), 841-851, 2022. <https://doi.org/10.1007/s10825-022-01906-9>
- Ge S. S., Yang C., Lee T. H., Adaptive Predictive Control Using Neural Network for a Class of Pure-Feedback Systems in Discrete Time. *IEEE Transactions on Neural Networks* 19(9), 1599-1614, 2008. <https://doi.org/10.1109/TNN.2008.2000446>
- Gopakumar A., Vijayakumari A., Model predictive current controller for grid connected PV inverter. 2017 International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies (ICCPCT), 1–6, 2017. <https://doi.org/10.1109/ICCPCT.2017.8074309>
- Hannan M. A., Abd Ghani Z., Mohamed A., An Enhanced Inverter Controller for PV Applications Using the dSPACE Platform. *International Journal of Photoenergy* 2010, 1–10, 2010. <https://doi.org/10.1155/2010/457562>
- Harashima F., Demizu Y., Kondo S., Hashimoto H., Application of neural networks to power converter control. *Conference Record- IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society)* pt 1, 1086–1091, 1989. <https://doi.org/10.1109/ias.1989.96777>
- Hassaine L., Olias E., Quintero J., Haddadi M., Digital power factor control and reactive power regulation for grid-connected photovoltaic inverter. *Renewable Energy* 34(1), 315-321, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.03.016>
- Jana J., Saha H., Das Bhattacharya K., A review of inverter topologies for single-phase grid-connected photovoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 72, 1256-1270, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.049>
- Khan H. S., Mohamed I. S., Kauhaniemi K., Liu L., Artificial Neural Network-Based Voltage Control of DC/DC Converter for DC Microgrid Applications. 2021 6th IEEE Workshop on the Electronic Grid (eGRID), 1-6, 2021. <https://doi.org/10.1109/eGRID52793.2021.9662132>
- Leon J. I., Kouro S., Franquelo L. G., Rodriguez J., Wu B., The Essential Role and the Continuous Evolution of Modulation Techniques for Voltage-Source Inverters in the Past, Present, and Future Power Electronics. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 63(5), 2688-2701, 2016. <https://doi.org/10.1109/TIE.2016.2519321>
- Mohamed A. A. S., Metwally H., El-Sayed A., Selem S. I., Predictive neural network based adaptive controller for grid-connected PV systems supplying pulse-load. *Solar Energy* 193(September), 139-147, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.09.018>
- Mohamed I. S., Rovetta S., Do T. D., Dragicevic T., Diab A. A. Z., A neural-network-based model predictive control of three-phase inverter with an output LC Filter. *IEEE Access* 7, 124737-124749, 2019. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2938220>
- Panigrahi R., Mishra S. K., Srivastava S. C., Grid Integration of Small-Scale Photovoltaic Systems- A Review. 2018 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS), 1-8, 2018. <https://doi.org/10.1109/IAS.2018.8544503>

- Rajab Al-Jaboury, O. N., Hamodat Z., Daoud R. W., Design of Power Control Circuit for Grid-Connected PV System-Based Neural Network. *Journal of Robotics and Control (JRC)* 5(3), 821-828, 2024. <https://doi.org/10.18196/jrc.v5i3.20751>
- Rivera M., Morales F., Baier C., Munoz J., Tarisciotti L., Zanchetta P., Wheeler P., A modulated model predictive control scheme for a two-level voltage source inverter. 2015 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), 2224-2229, 2015. <https://doi.org/10.1109/ICIT.2015.7125425>
- Selvan S., Nair P., Umayal U., A Review on Photo Voltaic MPPT Algorithms. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)* 6(2), 567, 2016. <https://doi.org/10.11591/ijece.v6i2.9204>
- Singh K., Swathi P., Reddy M. U., Performance analysis of PV inverter in microgrid connected with PV system employing ANN control. 2014 International Conference on Green Computing Communication and Electrical Engineering (ICGCCEE), 1-6, 2014. <https://doi.org/10.1109/ICGCCEE.2014.6922390>
- Syed I. M., Raahemifar K., Model Predictive Control of Three Phase Inverter for PV Systems. *International Journal of Energy and Power Engineering* 9(10), 1188-1193, 2015. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1109641>
- Vora K., Liu S., Dhulipati H., Deep Reinforcement Learning Based MPPT Control for Grid Connected PV System. 2024 IEEE 7th International Conference on Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS), 1-5, 2024. <https://doi.org/10.1109/ICPS59941.2024.10639977>
- Yağan Y. E., Vardar K., Ebeoğlu A., Investigation of MPPT Methods Used In PV Systems. *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSR-JEEE)* 13(2), 84-95, 2018. <https://doi.org/10.9790/1676-1302028495>