


## ÜÇ-FAZLI DÖRT-TELLİ ŞEBEKE BAĞLANTILI NÖTR NOKTASI KENETLİ BİR EVİRİCİ'NİN YSA İLE KONTROLÜ

Yunus Emre YAĞAN \*

Alınma: 08.11.2023; düzeltme: 18.03.2024; kabul: 24.05.2024

**Öz:** Bu çalışmada üç fazlı dört telli şebeke bağlantılı nötr noktası kenetli (NNK) bir eviricinin kontrolü için çok katmanlı algılayıcı yapısında olan bir yapay sinir ağı (YSA) kontrolcüsü tasarlanmış ve test edilmiştir. Tasarlanan YSA kontrolcüsü, MATLAB/Simulink ortamında oransal-integral (PI) kontrolcüler kullanılarak oluşturulan bir kontrol döngüsünden elde edilen veriler ile, Levenberg Marquardt geri yayılım eğitim algoritmasıyla eğitilmiştir. YSA kontrolcüsünün görevleri, NNK eviricide akım kontrolünü ve kapasitör gerilimlerinin dengelenmesini sağlamaktır. Önerilen YSA kontrolcüsünün performansı MATLAB/Simulink ortamında modellenen şebeke bağlantılı NNK evirici sistemi kullanılarak test edilmiştir. Test sonuçları, aynı evirici sisteminde PI kontrolcüler kullanılarak elde edilen sonuçlar ile karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Nötr noktası kenetli evirici, Oransal-integral kontrolcü, Şebeke bağlantılı evirici, Yapay sinir ağları.

### Three-Phase Four-Wire Grid-Connected Neutral Point Clamped Inverter with ANN Controllers

**Abstract:** In this study, an artificial neural network (ANN) controller with a multilayer perceptron structure is designed and tested for the control of a three-phase, four-wire grid-connected neutral point clamped (NPC) inverter. The designed ANN controller is trained using the Levenberg Marquardt backpropagation training algorithm, with data obtained from a control loop created using proportional-integral (PI) controllers in the MATLAB/Simulink environment. The tasks of the ANN controller are to provide current control and capacitor voltage balancing control in the NPC inverter. The performance of the proposed ANN controller is tested using the grid-connected NPC inverter system modeled in the MATLAB/Simulink environment. The test results are presented in comparison with the results obtained using PI controllers in the same inverter system.

**Keywords:** Artificial neural networks, Grid-connected inverter, Neutral point clamped inverter, Proportional-integral controller.

## 1. GİRİŞ

Yapay sinir ağına (YSA) dayalı kontrolcü yapıları son yıllarda şebeke bağlantılı gerilim kaynaklı eviricilerin kontrolünde yaygın olarak kullanılmaktadır (Babaie ve diğ., 2020; Bana ve Amin, 2022; Bana ve Amin, 2023; Babaie ve diğ., 2019; Li ve diğ., 2014; Li ve diğ., 2019). Bu duruma sebepler olarak, YSA'ların paralel olarak sisteme dâhil olabilme ve öğrenebilme yeteneği, doğrusal olmayan kodlama yeteneği, eğitildikten sonra hızlı bir şekilde sonuç üretme yeteneği, parametre belirsizlikleri ve gürültüler altında gösterdiği üstün performanslar ve

\* Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü Evliya Çelebi Yerleşkesi 43100 Merkez/KÜTAHYA

İletişim Yazarı: Yunus Emre YAĞAN (yunusemre.yagan@dpu.edu.tr)

hesaplama yüklerinde meydana getirdikleri azalış gösterilebilir (Bana ve Amin, 2023; Yağan ve Vardar, 2023; Aslan ve Yağan, 2016).

Babaie ve diğ. (2020), Bana ve Amin (2022), Bana ve Amin (2023), Li ve diğ. (2014) ve Li ve diğ. (2019)'da sunulan çalışmaların ortak özelliği senkron referans çerçeve (SRF) tabanlı kontrolcülerin kullanıldığı, şebeke bağlantılı bir evirici uygulaması için YSA akım kontrolcüsü önermektir. Ancak, bu çalışmalarda, kullanılan evirici devre yapılarında, evirici kontrol gereksinimlerinde ve kontrol sistemi içerisinde kullanılan kontrol döngülerinde genel mânâda farklılıklar bulunmaktadır. Bu farklılıklara ek olarak, önerilen YSA kontrolcü yapıları da, ağı giriş çıkış bilgileri, katman sayıları, nöron sayıları, aktivasyon fonksiyonları gibi çeşitli tasarım farklılıkları içermektedir. Bu perspektiften değerlendirildiğinde, çeşitli güç elektroniği uygulamaları için birçok farklı YSA kontrolcü önermek mümkündür. Tam olarak bu motivasyon ile bu çalışmada üç fazlı üç seviyeli nötr noktası kenetli (NNK) dört telli bir şebeke bağlantılı eviricinin kontrolü için yeni bir YSA kontrolcü önerilmiştir. Bu YSA kontrolcü dört adet oransal-integral (PI) kontrolcü kullanılarak gerçekleştirilen kapasitör gerilim dengeleme ve akım kontrolü gereksinimlerini yerine getirmektedir. Önerilen YSA kontrolcü çok katmanlı algılayıcı (ÇKA) ağ yapısındadır ve üç katmanlıdır. Giriş katmanı dört elemandan, gizli katman üç adet nöron ve çıkış katmanı ise üç elemandan oluşmaktadır. Gizli katmanda tanjant sigmoid aktivasyon fonksiyonları, çıkış katmanında ise lineer aktivasyon fonksiyonları kullanılmıştır. Ağı eğitimi Levenberg Marquardt geri yayılım eğitim algoritması ile gerçekleştirilmiştir. Eğitim verisi olarak üç fazlı dört telli, şebeke bağlantılı NNK eviricinin MATLAB/Simulink ortamında, PI kontrolcüler kullanılarak oluşturulan benzetim verileri kullanılmıştır. YSA eğitimleri çevrimdışı olarak, denetimli öğrenme şeklinde gerçekleştirilmiştir.

Burada sunulan çalışma ve Babaie ve diğ. (2020)'de sunulan çalışma, üç fazlı şebeke bağlantılı bir NNK evirici için bir YSA kontrolcü önermektedir fakat iki çalışma arasında çeşitli farklılıklar bulunmaktadır. Babaie ve diğ. (2020)'de sunulan çalışmada kontrol edilen şebeke bağlantılı evirici üç tellidir. Önerilen YSA kontrolcü, iki adet model öngörülü akım kontrolcüsü ve bir adet PI kapasitör gerilim dengeleyicisinden oluşan kontrol döngüsünden elde edilen veriler kullanılarak tasarlanmıştır. Tasarlanan YSA kontrolcü, üç adet giriş, üç adet çıkış ve içerisinde on adet nöron bulunan bir adet gizli katmandan oluşmaktadır. Burada sunulan çalışmada ise kontrol edilen şebeke bağlantılı evirici dört tellidir. Önerilen YSA kontrolcü, dört adet PI kontrolcüden oluşan kontrol döngüsünden elde edilen veriler kullanılarak tasarlanmıştır. Tasarlanan YSA kontrolcü, dört adet giriş, üç adet çıkış ve içerisinde üç adet nöron bulunan bir adet gizli katmandan oluşmaktadır.

Evirici çıkışında elde edilen akım ve gerilimlerin içerdiği harmonik kirliliği belirlemek için akım ve gerilimlerin toplam harmonik bozulma (THB) değerleri hesaplanmaktadır. Hem akım hem de gerilim için kullanılan, THB hesaplama fonksiyonu Denklem (1)'de verilmiştir.

$$\%THB_X = \% \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} X_n^2}}{X_F} * 100, \quad (X = V \text{ ya da } I) \quad (1)$$

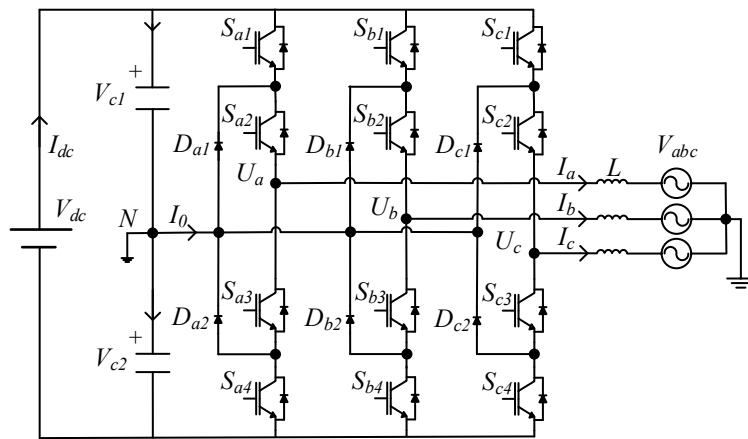
Denklem (1)'deki  $X_n$  n. harmonik bileşenin etkin değerini,  $X_F$  ise temel bileşenin etkin değerini göstermektedir (<https://www.mathworks.com/help/sps/powersys/ref/thd.html>; Adak ve diğ., 2016). Bu çalışmada THB ölçümleri, Matlab/Simulink'te bulunan Powergui FFT Analysis Tool ile gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın ikinci bölümünde, şebeke bağlantılı NNK eviricinin modeli ve PI kontrolcü tabanlı kontrol döngüsü sunulmuştur. Üçüncü bölümde, YSA kontrolcünün tasarımı gerçekleştirilmiş ve YSA tabanlı kontrol döngüsü hazırlanmıştır. Dördüncü bölümde şebeke bağlantılı evirici sisteminin MATLAB/Simulink ortamında oluşturulan benzetiminde PI ve YSA kontrolcü tabanlı kontrol sistemlerinin performansları incelenmiş ve birbirleriyle

karşılaştırılmıştır. Son bölümde ise sonuçlar özetlenmiş ve gelecek çalışmalar için öneriler getirilmiştir.

## 2. ÜÇ FAZLI DÖRT TELLİ ŞEBEKE-BAĞLANTILI NNK EVİRİCİ

Çok seviyeli evirici yapıları, genel olarak çıkış geriliminde bulunan THB değerlerinde ve yarıiletken anahtarların maruz kaldığı birim zamanda meydana gelen gerilim değişimlerinde ( $dV/dt$ ) azalmalar sağladığından dolayı güç kalitesi problemlerini azaltmaktadır. Bu nedenle çeşitli güç elektroniği uygulamalarında, geleneksel iki seviyeli eviricilere kıyasla çok seviyeli eviriciler daha fazla tercih edilmektedir (Babaie ve diğ., 2020; Babaie ve diğ., 2019; Yağan ve Vardar, 2023; Lim ve diğ., 1999). Şekil 1’de, üç faz şebeke bağlantılı, gerilim kaynaklı, üç seviyeli dört telli klasik bir NNK evirici topolojisi görülmektedir. NNK evirici ilk olarak Nabea ve diğ. (1981)’de önerilmiştir. NNK evirici devre yapısında, doğru akım (DA) kaynak gerilimi, iki adet özdeş kapasitör ile ikiye bölünmektedir. Şekil 1’de görülmekte olan, uçlarında  $V_{c1}$  gerilimi bulunan kapasitör ile evirici çıkışında elde edilen alternatif akım (AA) gerilimlerin pozitif yarı çevrimi, uçlarında  $V_{c2}$  gerilimi bulunan kapasitör ile de çıkıştaki AA gerilimlerin negatif yarı çevrimi oluşturulmaktadır. Bu yüzden, evirici çıkışından alınan AA gerilimin bir periyodundaki pozitif ve negatif yarı çevrimlerin, simetrik olması için  $V_{c1}$  ve  $V_{c2}$ ’nin DA kaynak geriliminin yarısına eşit olacak şekilde eşit gerilime sahip olmaları gerekmektedir. NNK eviricide kaynak geriliminin bu şekilde ikiye bölünmesi, evirici devresinde kullanılan IGBT anahtarların DA bara geriliminin yarısına dayanabilecek şekilde seçilebilmesi avantajını sağlamaktadır. Ancak  $V_{c1}$  ve  $V_{c2}$  gerilim dengesi sağlanamazsa eğer, düşük değerli olarak seçilen IGBT anahtarların DA bara geriliminin tamamına maruz kalması söz konusu olacaktır. Bu da yarı iletken anahtarların kalıcı olarak zarar görmesine sebep olabilmektedir. Şekil 1’de görüldüğü gibi, NNK evirici devresinde, her fazda 4 adet IGBT ve 2 adet kenetleme diyotu bulunmaktadır. Kenetleme diyotları seri bağlı olup orta noktaları kapasitörlerin orta noktasına bağlanmaktadır. Her faz için bir adet olan bacağın üst kolundaki iki IGBT anahtar ( $S_{x1}$  ve  $S_{x2}$ ) ve bir kenetleme diyotu ( $D_{x1}$ ) kullanılarak,  $V_{c1}$  gerilimi ile evirici çıkışının pozitif yarı çevrimi modellenmektedir. Alt koldaki iki IGBT anahtar ( $S_{x3}$  ve  $S_{x4}$ ) ve bir kenetleme diyotu ( $D_{x2}$ ) kullanılarak ise  $V_{c2}$  gerilimi ile evirici çıkışının negatif yarı çevrimi modellenmektedir.  $S_{x1}$  ile  $S_{x3}$  anahtarı,  $S_{x4}$  ile de  $S_{x2}$  anahtarı komplementer olarak anahtarlanmaktadır ( $x=a, b$  ve  $c$ ). Bir faz/bacak için anahtarlama durumları ve ilgili çıkış gerilimleri Tablo 1’de verilmiştir.



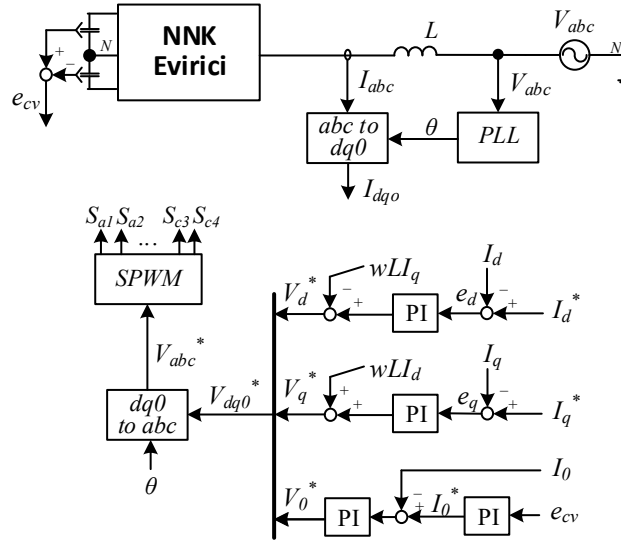
**Şekil 1:**

Üç fazlı dört telli şebeke bağlantılı NNK evirici devresi.

**Tablo 1. NNK eviricinin bir fazı için anahtarlama durumları ve çıkış gerilim seviyeleri.**

$S_{x1}$	$S_{x2}$	$S_{x3}$	$S_{x4}$	$U_{xN}$
1	1	0	0	$+V_{c1}$ (pozitif seviye)
0	1	1	0	0 (sıfır seviye)
0	0	1	1	$-V_{c2}$ (negatif seviye)

Şebeke bağlantılı NNK evirici için literatürdeki klasik kontrolcüler kullanılarak oluşturulan kontrol sistemi blok diyagramı Şekil 2’de görülmektedir. Şekilden görülebildiği gibi kontrol döngüsü senkron referans çerçevesinde oluşturulmuştur. Bu çerçevede  $abc$  ekseninden  $dq0$  eksenine dönüştürülen evirici çıkış akımlarının  $d$  ve  $q$  bileşenleri PI kontrolcüler ile kontrol edilmektedir. Dört telli NNK eviricide, yükün nötr noktası ile kapasitörlerin orta noktasını birleştiren yoldan yük akımının sıfır bileşeni akmaktadır. Bu sıfır bileşen akımın kontrol edilmesiyle kapasitör gerilimlerinin dengede tutulması sağlanmaktadır (Lim ve diğ., 1999). Bu yüzden, yük akımının sıfır bileşeni, Şekil 2’de gösterildiği gibi kapasitör gerilimlerinin dengelenmesi için oluşturulan döngüde kontrol edilmektedir. Burada ifade edilen PI tabanlı kontrol döngüsü kullanılarak elde edilen, şebeke bağlantılı evirici MATLAB/Simulink benzetim sonuçları, önerilen YSA kontrol döngüsü kullanılarak elde edilen sonuçlarla birlikte çalışmanın devamında sunulmuştur.

**Şekil 2:**

*Şebeke bağlantılı NNK eviricinin PI kontrolcüler kullanılarak oluşturulan kontrol sistemi.*

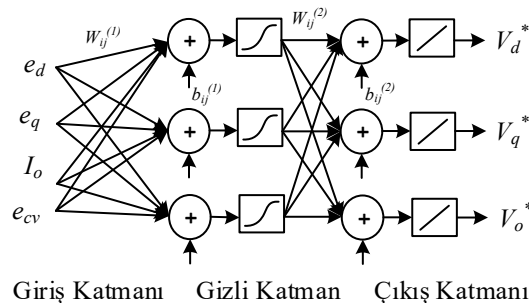
### 3. ÖNERİLEN YSA KONTROLÇÜ

Bu bölümde, önce Şekil 2’de gösterilen, PI kontrolcü tabanlı kontrol döngüsü kullanılarak, şebeke bağlantılı NNK evirici sistemi MATLAB/Simulink’te başarılı bir şekilde benzetilmiştir. Sonrasında, bir YSA kontrolcü tasarlamak için bu benzetim kullanılarak eğitim verileri biriktirilmiştir. Biriktirilen YSA eğitim veri seti, giriş verileri ve çıkış verileri olmak üzere iki parçadan oluşmaktadır. YSA giriş verileri, Şekil 2’de görülen  $ed$ ,  $eq$ ,  $I_0$  ve  $ecv$  bilgilerinden oluşmaktadır. Çıkış verileri ise  $V_d^*$ ,  $V_q^*$  ve  $V_0^*$  bilgilerinden oluşmaktadır. YSA eğitim veri seti, evirici referans akımının 13 A, 14 A ve 15 A olduğu durumlardaki verileri içermektedir. Bu

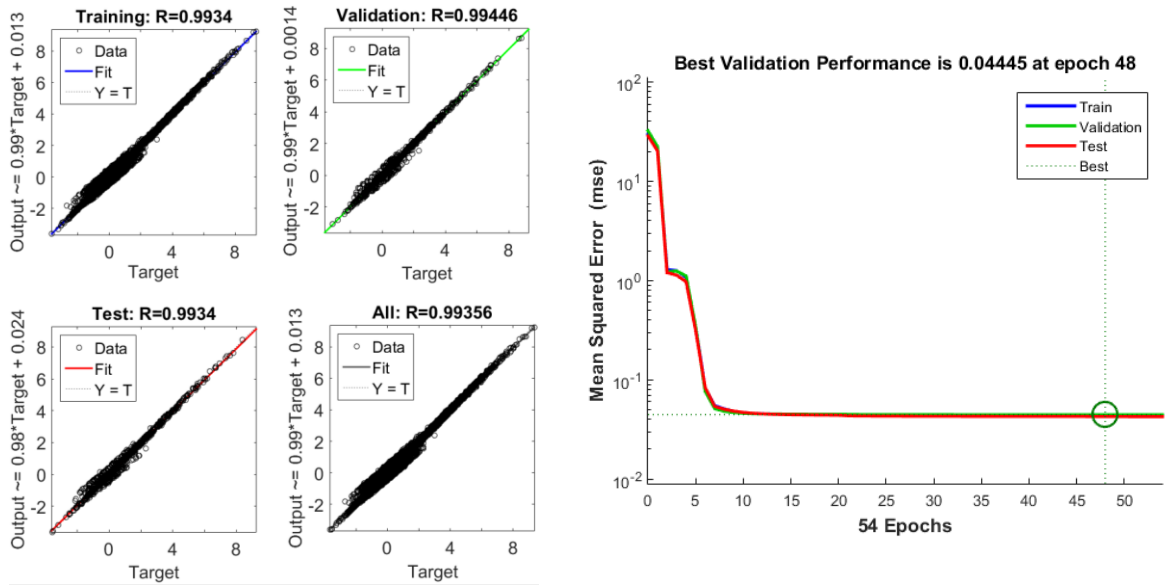
bilgiler kullanılarak  $4 \times 1800$  boyutunda bir giriş matrisi ve  $3 \times 1800$  boyutunda bir hedef çıkış matrisi oluşturulmuş ve YSA eğitim seti olarak kullanılmıştır. Bu şekilde önceden belirlenen giriş ve hedef çıktıları içeren eğitim verileri kullanılarak gerçekleştirilen YSA eğitime danışmalı öğrenme denilmektedir. YSA eğitimleri, MATLAB ortamında nstart kullanıcı arayüzü ile çevrimdışı olarak gerçekleştirilmiştir. Bu arayüz kullanılarak oluşturulan çok katmanlı algılayıcı ağı yine bu arayüz kullanılarak Levenberg Marquardt geri yayılım eğitim algoritmasıyla eğitilmiştir. Eğitimi başarıyla gerçekleştirilen çok katmanlı algılayıcı ağın genel yapısı Şekil 3'te verilmiştir. Şekil 3'te görülen ağ, dört girişli ve üç çıkışlıdır. Ağın içerisinde bir adet gizli katman ve bu gizli katmanda üç adet nöron bulunmaktadır. Gizli katmandaki nöronlarda tanjant hiperbolik aktivasyon fonksiyonları kullanılmıştır. Tasarlanan ağın çıkış katmanında ise lineer aktivasyon fonksiyonları kullanılmıştır. Şekil 3'te bulunan  $W_{ij}(1)$  ve  $b_{ij}(1)$  sabitleri giriş katmanı için,  $W_{ij}(2)$  ve  $b_{ij}(2)$  sabitleri ise gizli katman için sırasıyla ağırlık ve ön (bias) değerlerini göstermektedir. Ağırlık değerleri her bir girişin her bir nöron üzerindeki etkisini temsil etmektedir. Bias değerleri ise nöronlar için DA ofset sağlamaktadır. Nöron çıkışlarının elde edilmesi için kullanılan aktivasyon fonksiyonları ise, giriş ve çıkış arasındaki lineer olmayan ilişkiyi ifade etmektedir (Aslan ve Yağan, 2017).

Eğitim sonunda elde edilen ağın gerçek çıktıları ve eğitim dosyasında bulunan hedef çıktıları arasındaki regresyon uyumu grafikleri ve eğitim performansının değerlendirilmesi için kullanılan ortalama karesel hata (mean square error, MSE) fonksiyonuna ait grafik Şekil 4'te verilmiştir. Şekil 4 a.'da eğitim (%75), onaylama (%15), test (%15) verileri ve toplam (%100) veriler için regresyon uyum grafikleri ayrı ayrı görülmektedir. Sonuçlar incelendiğinde, ideal durumda 1 olması gereken regresyon (R) değerinin tüm durumlar için 0.993'ten daha yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca regresyon grafiklerindeki eğitim, test ve onaylama verileri arasındaki korelasyon incelendiğinde, eğitilen ağın aşırı öğrenmeye ve eksik öğrenmeye de uğramadan başarılı bir şekilde eğitildiği anlaşılmaktadır. Şekil 4 b.'den ise 48. epokta en iyi hata değerine ulaşıldığı ve bu epoktaki MSE değerinin 0.04445 olduğu görülmektedir.

Şebeke bağlantılı NNK evirici için önerilen, YSA kontrolcü kullanılarak oluşturulan, kontrol sistemi blok diyagramı Şekil 5'te görülmektedir. Şekil 5, PI kontrolcüler kullanılarak oluşturulan blok diyagramını gösteren Şekil 2 ile karşılaştırıldığında, dört adet PI kontrolcü yerine aynı görevleri gerçekleştirmek üzere bir adet YSA kontrolcünün kullanıldığı anlaşılmaktadır. İki kontrol döngüsünde de yarıiletken anahtarlar için anahtarlama sinyalleri, sinüzoidal darbe genişlik modülasyonu (SDGM) yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Bir sonraki bölümde iki kontrol döngüsü içinde benzetimden elde edilen sonuçlar incelenmiş ve kontrol performansları birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada yapılanları özetleyen bir akış şeması Şekil 6'da verilmiştir.



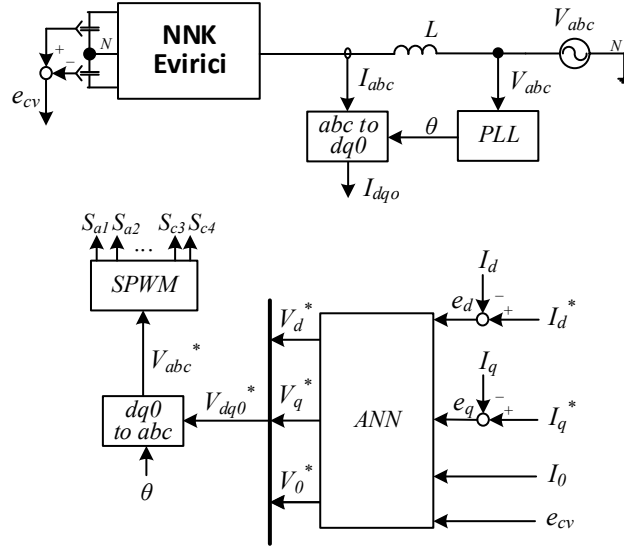
**Şekil 3:**  
Tasarlanan YSA kontrolcü yapısı.



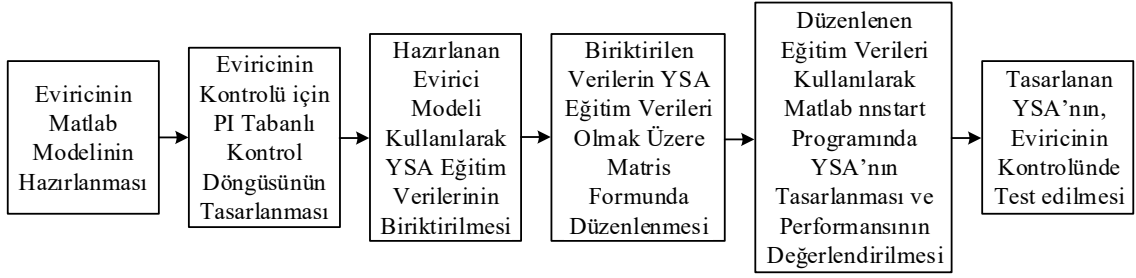
a.

b.

**Şekil 4:**  
Tasarlanan YSA kontrolcünün eğitim sonuçları.



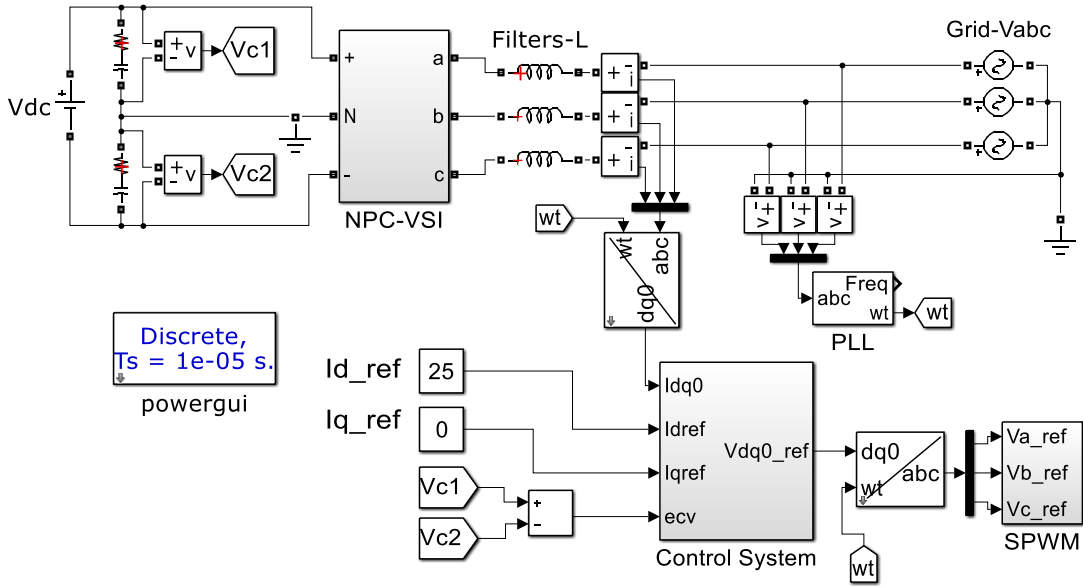
**Şekil 5:**  
Şebeke bağlantılı NNK eviricinin YSA kontrolcü kullanılarak oluşturulan kontrol sistemi.



**Şekil 6:**  
YSA kontrolcü tasarlama ve test etme akış şeması.

#### 4. ŞEBEKE BAĞLANTILI EVİRİCİ BENZETİM SONUÇLARI

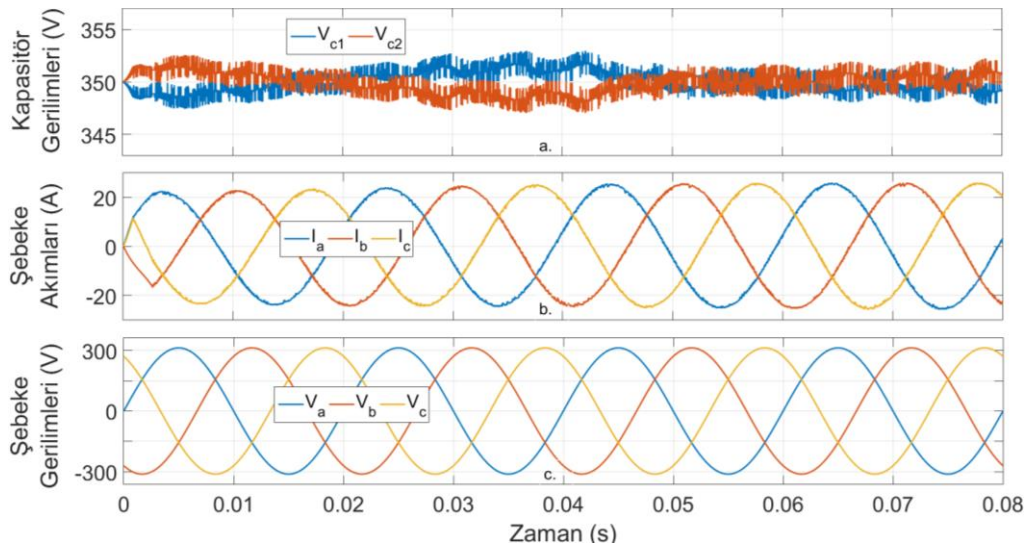
MATLAB/Simulink'te modellenen üç fazlı üç seviyeli dört telli, şebeke bağlantılı NNK evirici benzetiminin blok şeması Şekil 7'de verilmiştir. Benzetim testleri için kullanılan parametreler ise Tablo 2'de verilmiştir. Bu benzetim sistemi ile PI tabanlı kontrol döngüsü (Şekil 2) ve YSA tabanlı kontrol döngüsü (Şekil 5) uygulanmıştır ve kontrol performansları incelenmiştir. İlk testler 25 A referans akım değeri ile dengeli koşullar altında yapılmıştır. Gerçekleştirilen teste ait sonuçlar, PI tabanlı kontrol sistemi ve YSA tabanlı kontrol sistemi için sırasıyla Şekil 8 ve 9'da gösterilmiştir.



**Şekil 7:**  
Şebeke bağlantılı NNK evirici benzetim sistemi.

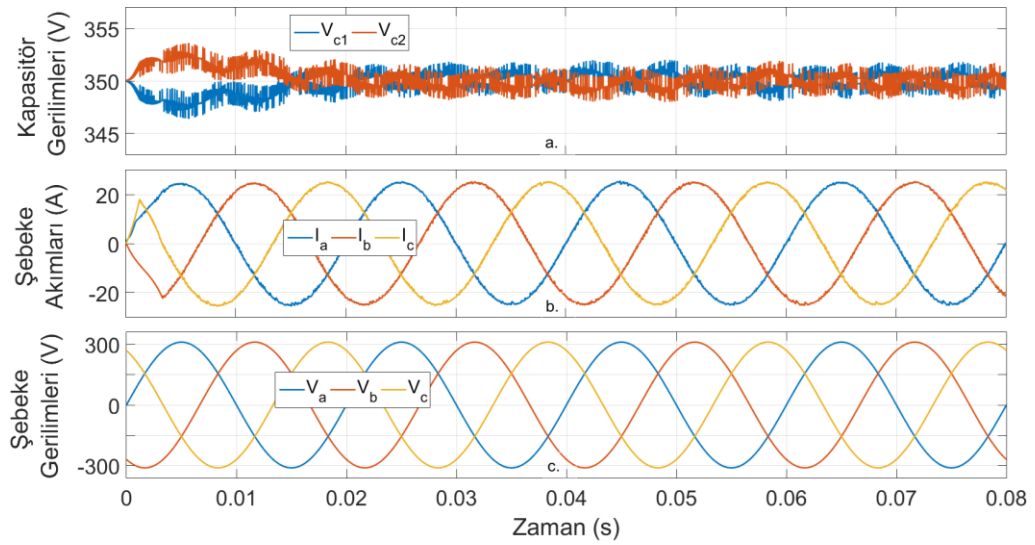
**Tablo 2. Şebeke bağlantılı NNK evirici benzetim testlerinde kullanılan parametreler.**

DA Kaynak Gerilimi	700 V
DA Bara Kapasitörleri	4700 uF
Şok Bobinleri	8 mH
Şebeke Faz Gerilimi	220 Vrms
Şebeke Frekansı	50 Hz
Anahtarlama Frekansı	20 kHz



**Şekil 8:**

*Dengeli koşullar altında, PI tabanlı kontrol döngüsü kullanıldığında elde edilen sonuçlar.*

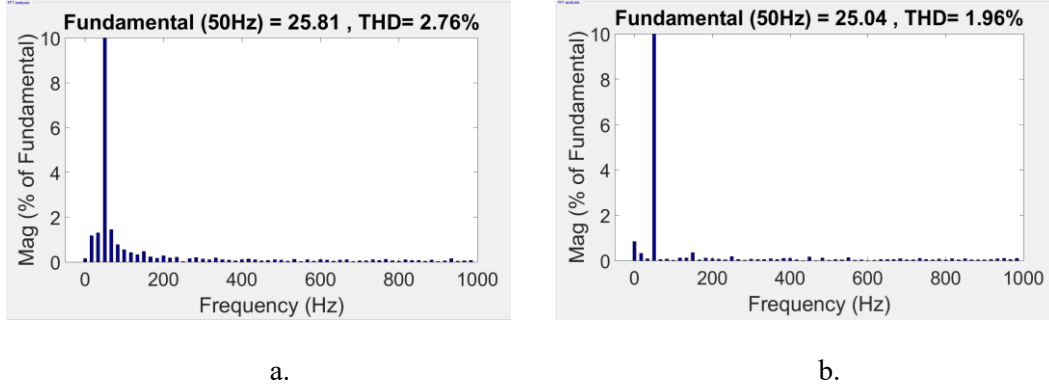


**Şekil 9:**

*Dengeli koşullar altında, YSA tabanlı kontrol döngüsü kullanıldığında elde edilen sonuçlar.*



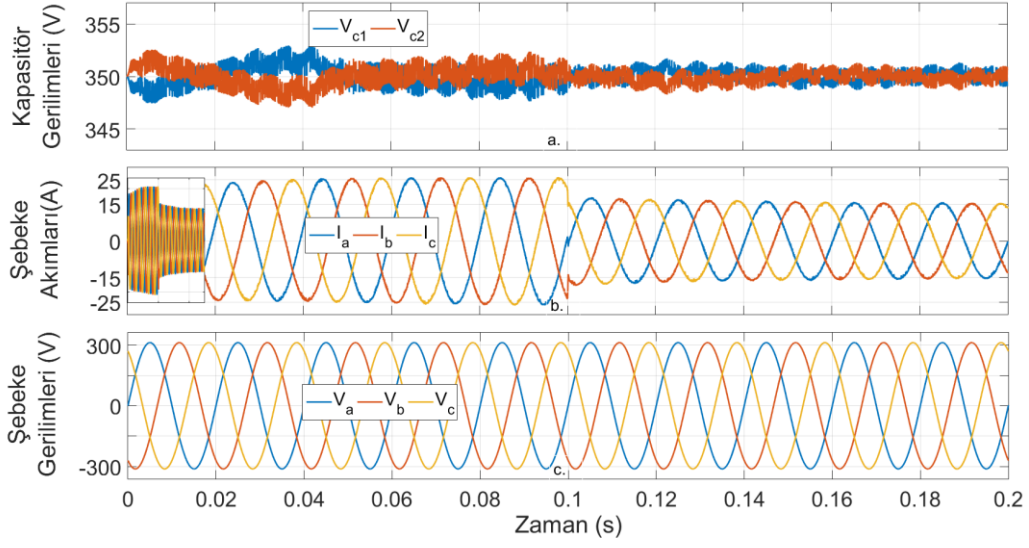
Şekil 8 ve 9 incelendiğinde, kapasitör gerilimlerinin ( $V_{c1}$  ve  $V_{c2}$ ) iki kontrol döngüsünde de DA kaynak geriliminin yarısına eşit olacak şekilde dengede kaldığı görülmektedir. Şebeke akımları ( $I_{abc}$ ) ve şebeke gerilimleri ( $V_{abc}$ ) ise olması gerektiği gibi, aynı frekans ve faz değerindedir. Şekil 10'da PI tabanlı ve YSA tabanlı kontrol döngüleri kullanıldığında elde edilen şebeke akımlarına ait harmonik spektrum analizleri verilmiştir. Şekil 10 elde edilirken  $t=0.08$  s'den başlayan 3 periyotluk akım bilgileri kullanılmıştır.



**Şekil 10:**

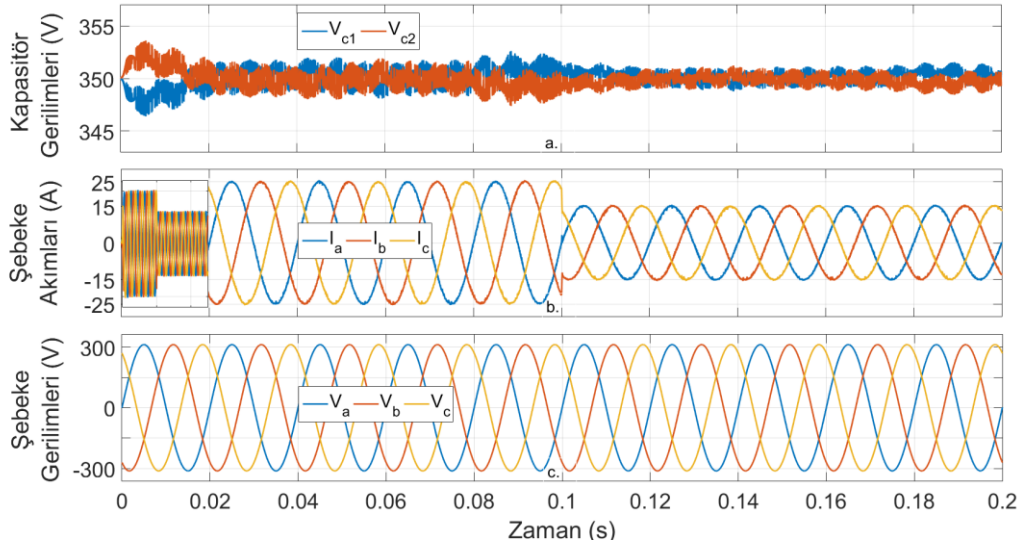
*Şebeke akımları harmonik spektrum analizi; a. PI kontrol döngüsü kullanıldığında b. YSA kontrol döngüsü kullanıldığında.*

Şekil 10 a.'da akımın temel bileşeninin genliğinin 25.81 olduğu, THB değerinin ise %2.76 olduğu görülmektedir. Şekil 10 b.'de ise akımın temel bileşeninin genliğinin 25.04 olduğu, THB değerinin ise %1.96 olduğu görülmektedir. Yapılan incelemeler sonucunda,  $t=0.3$  s'ye gelindiğinde, PI tabanlı kontrol döngüsü kullanıldığında akımın temel bileşeninin genliği 25.08 ve THB değeri %1.93 olarak iki kontrolcünün hem genlik değeri hem de THB değeri açısından kontrol performanslarının yaklaşık olarak eşit duruma geldiği görülmektedir. Bu incelemeden, YSA tabanlı kontrol döngüsü kullanıldığında evirici çıkışının kararlı hâle daha hızlı bir şekilde yaklaştığı görülmektedir. İkinci testler, Id referans akımı  $t=0.1$  s'de adım değişimiyle 25A'den 15A'ye düşürülerek oluşturulan kararsız koşullar altında gerçekleştirilmiştir. Test sonuçları, Şekil 11, 12, ve 13'te verilmiştir. Şekil 11 ve 12, sırasıyla PI tabanlı ve YSA tabanlı kontrol döngüleri kullanılarak elde edilen kapasitör gerilimleri, şebekeye aktarılan akımlar ve şebeke gerilimlerini göstermektedir. Şekil 13'te ise geçici evrelerin açıkça görülebilmesi için, şebekeye aktarılan akımların  $dq0$  değerleri verilmiştir.



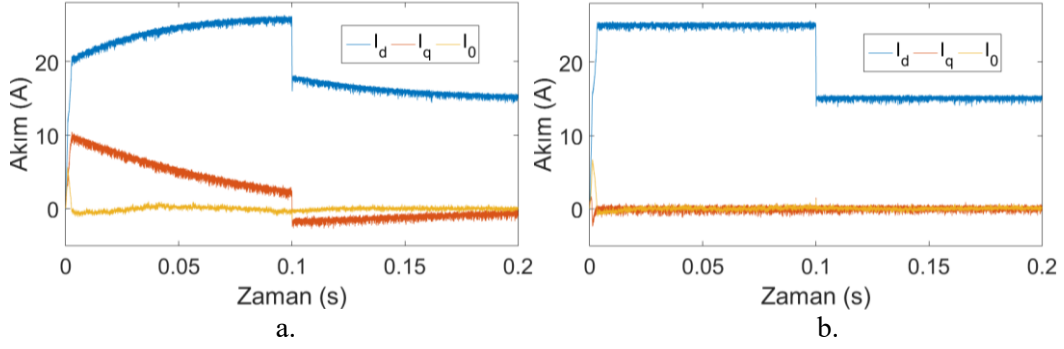
**Şekil 11:**

*Referans akım değerinde ani bir değişim meydana geldiğinde, PI tabanlı kontrol döngüsü ile elde edilen sonuçlar.*



**Şekil 12:**

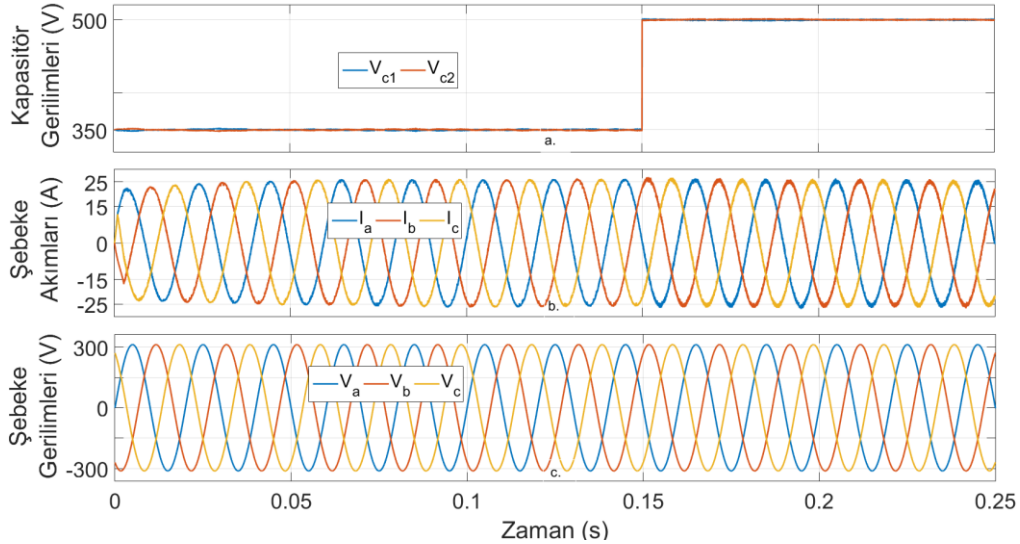
*Referans akım değerinde ani bir değişim meydana geldiğinde, YSA tabanlı kontrol döngüsü ile elde edilen sonuçlar.*



**Şekil 13:**

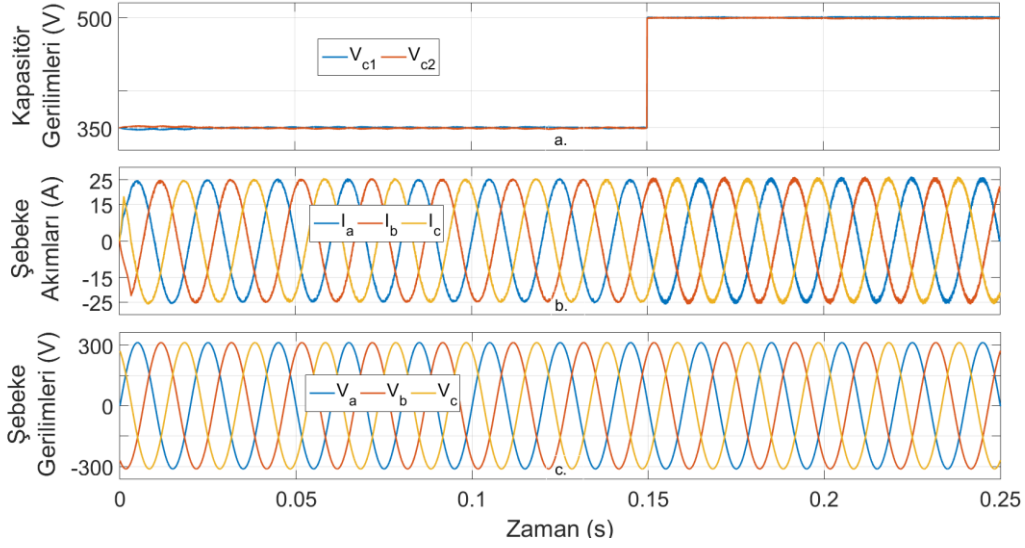
Referans akım değerinde ani bir değişim meydana geldiğinde, şebeke akımının  $dq0$  değerleri **a.** PI kontrolcüler kullanıldığında **b.** YSA kontrolcü kullanıldığında.

Şekil 11 a. ve 12 a. incelendiğinde, referans akımlarda bir adım değişimi meydana geldiğinde herhangi bir geçici hâl evresi oluşmadan kapasitör gerilim dengesinin her iki kontrol döngüsüyle de sağlanabildiği görülmektedir. Şekil 11 b. ve 12 b.'deki şebeke akımları incelendiğinde, iki kontrol döngüsüyle de yeni referans akımların düzgün bir şekilde sağlanabildiği görülmektedir. Şekil 11 b. ve 12 b.'ye dikkat edildiğinde, hem testin ilk başladığı andaki ( $t=0$  s) geçici evrenin hem de adım değişiminin meydana geldiği andaki ( $t=0.1$  s) geçici evrenin, YSA tabanlı kontrol döngüsünde PI tabanlı kontrol döngüsünden çok daha kısa sürdüğü anlaşılmaktadır. Geçici evrelerin varlığının daha iyi gözlemlenebilmesi için, Şekil 11 ve 12'de şebeke akımlarının uzaklaştırılmış bir görüntüsü, şebeke akımlarının başlangıç anına çakışık olarak şebeke akımları ile birlikte verilmiştir. Şekil 13 a. ve b. İncelendiğinde, YSA kontrolcü kullanıldığında (b.) şebeke akımlarının  $d$ ,  $q$  ve  $0$  bileşenlerinin hem testin başlangıcında hem de referans akımda ani bir değişim meydana geldiğinde hızlı bir şekilde kararlı hâle ulaştığı görülmektedir. PI kontrolcüler kullanıldığında ise kararlı hâle ulaşmak için geçen sürenin 0.1 s'den daha uzun sürdüğü görülmektedir. Önerilen YSA kontrolcünün performans testleri, son olarak, DA kaynak geriliminin ani olarak 700 V'tan 1000 V'a yükseltildiği şartlar altında gerçekleştirilmiştir. Bu testlerden elde edilen sonuçlar Şekil 14 ve 15'te verilmiştir.



**Şekil 14:**

DA kaynak geriliminde ani bir değişim meydana geldiğinde, PI tabanlı kontrol döngüsü ile elde edilen sonuçlar.



**Şekil 15:**

*DA kaynak geriliminde ani bir değişim meydana geldiğinde, YSA tabanlı kontrol döngüsü ile elde edilen sonuçlar.*

Şekil 14 ve 15 incelendiğinde, DA kaynak geriliminde ani bir artış olduğunda, iki kontrol döngüsüyle de kapasitör gerilimlerinin dengede kaldığı, şebeke akımlarının ve gerilimlerinin ise herhangi bir geçici evre oluşmadan sabit genlikte kaldıkları görülmektedir.

## 5. SONUÇ

Bu çalışmada üç fazlı şebeke bağlantılı, dört telli nötr noktası kenetli bir evirici uygulaması için yeni bir YSA kontrolcü önerilmiştir. YSA kontrolcü hem akım kontrolünü sağlamaktadır hem de kapasitör gerilimleri dengesini gerçekleştirmektedir. Önerilen kontrolcü ile kararlı hâlde %1.96 THB değerinde yük akımı sağlanmaktadır. Yük akımında ve DC kaynakta meydana getirilen adım değişimlerinde de kontrolcünün performansları incelenmiştir. Önerilen kontrolcü ile hem akım kontrolü hem de kapasitör gerilimlerinin dengesi tüm test durumlarında sağlanabilmiştir. Sonraki çalışmalarda, önerilen YSA kontrolcünün şebeke geriliminde bozulmalar meydana geldiğinde, kontrol döngüsünde kullanılan değerlerde ölçüm hataları veya gürültüler olduğundaki performanslarının da incelenmesi planlanmaktadır. Ayrıca farklı yükler altındaki performanslarının ve farklı YSA tasarımlarının da incelenmesi hedeflenmektedir.

## ÇIKAR ÇATIŞMASI

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

## YAZAR KATKISI

Yunus Emre Yağan tasarladı, programları oluşturdu ve makaleyi yazdı.

## KAYNAKLAR

1. Babaie, M., Sharifzadeh, M., ve Al-Haddad, K. (2020, August) Three-phase grid-connected NPC inverter based on a robust artificial neural network controller, *IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*, 1-5. doi:10.1109/PESGM41954.2020.9281531.
2. Bana, P. R., ve Amin, M. (2022, October) Comparative assessment of supervised learning ANN controllers for grid-connected VSC system, *48th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2022)*, 1-6. doi:10.1109/IECON49645.2022.9969070.
3. Bana, P. R., ve Amin, M. (2023, March) State-space modelling and stability analysis of ANN controller for grid-connected VSC system, *IEEE IAS Global Conference on Renewable Energy and Hydrogen Technologies (GlobConHT)*, 1-6. doi:10.1109/GlobConHT56829.2023.10087412.
4. Babaie, M., Sebaaly, F., Sharifzadeh, M., Kanaan, H. Y., ve Al-Haddad, K. (2019, February) Design of an artificial neural network control based on levenberg-marquart algorithm for grid-connected packed U-Cell inverter, *IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, 1202-1207. doi:10.1109/ICIT.2019.8755098.
5. Li, S., Fairbank, M., Johnson, C., Wunsch, D. C., Alonso, E., ve Proao, J. L. (2014) Artificial neural networks for control of a grid-connected rectifier/inverter under disturbance, dynamic and power converter switching conditions, *IEEE transactions on neural networks and learning systems*, 25(4), 738-750. doi:10.1109/TNNLS.2013.2280906.
6. Li, S., Sun, Y., Ramezani, M., ve Xiao, Y. (2019) Artificial neural networks for Volt/VAR control of DER inverters at the grid edge, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 10(5), 5564-5573. doi:10.1109/TSG.2018.2887080.
7. Yağan, Y. E., ve Vardar, K. (2023) Artificial neural networks controllers for three-phase neutral point clamped inverters, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 41, 101390. doi:10.1016/j.jestch.2023.101390.
8. Aslan, Y., ve Yağan, Y. E. (2016, June) ANN based fault location for medium voltage distribution lines with remote-end source, *International Symposium on Fundamentals of Electrical Engineering (ISFEE)*, 1-5. doi:10.1109/ISFEE.2016.7803203.
9. Lim, S. K., Kim, J. H., ve Nam, K. (1999, July) A DC-link voltage balancing algorithm for 3-level converter using the zero sequence current, *30th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. Record.(Cat. No. 99CH36321) 2*, 1083-1088. doi:10.1109/PESC.1999.785646.
10. Nabae, A., Takahashi, I., ve Akagi, H. (1981) A new neutral-point-clamped PWM inverter, *IEEE Transactions on industry applications*, (5), 518-523. doi: 10.1109/TIA.1981.4503992.
11. Aslan, Y., ve Yağan, Y. E. (2017) Artificial neural-network-based fault location for power distribution lines using the frequency spectra of fault data, *Electrical Engineering*, 99, 301-311. doi:10.1007/s00202-016-0428-8.
12. Adak, S., ve Cangı, H. (2015). Analysis and simulation total harmonic distortion of output voltage three level diode clamped inverter in photovoltaic system, *Bitlis Eren University. Fen Bilimleri Dergisi*, ISSN, 2147-3129.
13. <https://www.mathworks.com/help/sps/powersys/ref/thd.html>, Erişim Tarihi:15.03.2024, Konu: Toplam Harmonik Bozulma.

