



## Design and experimental implementation of DC-DC converter based self-tuning fuzzy PI controller

Ahmet Kaysal<sup>1\*</sup>, Selim Köroğlu<sup>2</sup>, Yüksel Oğuz<sup>3</sup>, Kübra Kaysal<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Electrical Engineering, Engineering Faculty, Afyon Kocatepe University, 03200, Afyonkarahisar, Türkiye

<sup>2</sup>Department of Electrical Electronics Engineering, Engineering Faculty, Pamukkale University, 20160, Denizli, Türkiye

<sup>3</sup>Department of Electrical Electronics Engineering, Technology Faculty, Afyon Kocatepe University, 03200, Afyonkarahisar, Türkiye

### Highlights:

- Self-tuning fuzzy PI controller design for a DC-DC converter
- Performance comparison between the self-tuning fuzzy PI controller and conventional PI controller
- Performance analysis of DC-DC converter depending on load and frequency changes

### Keywords:

- Fuzzy controller
- DC-DC power converters
- Pulse width modulation
- Duty cycle

### Article Info:

Research Article

Received: 19.05.2020

Accepted: 12.02.2022

### DOI:

10.17341/gazimmfd.739775

### Correspondence:

Author: Ahmet Kaysal  
e-mail: akaysal@aku.edu.tr  
phone: +90 272 218 2406

### Graphical/Tabular Abstract

In this study, self-tuning fuzzy PI (SFPI) controller-based DC-DC boost converter topology is presented. The fuzzy logic control technique is used to improve the output voltage regulation of the converter and increase the converter efficiency. The simulation model shown in Figure A is created to examine the response of the proposed SFPI and conventional PI controllers to the step response.

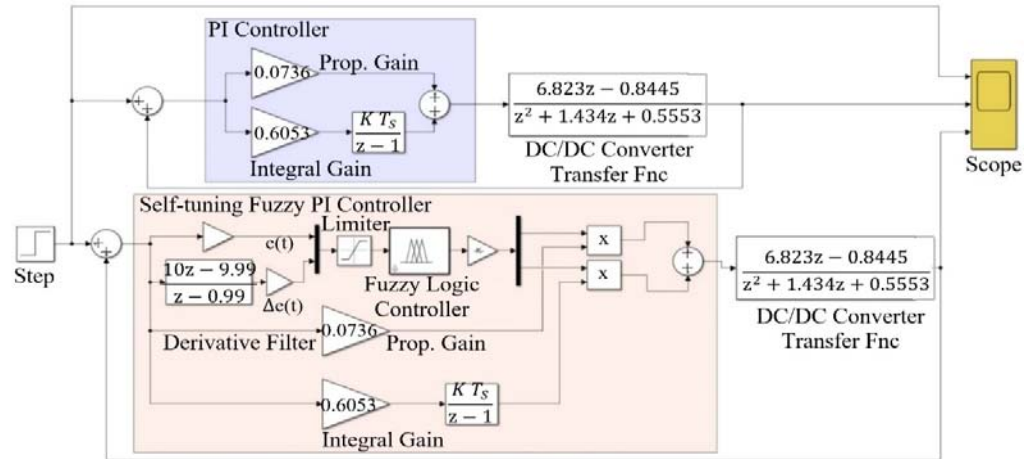


Figure A. Simulation model of proposed SFPI and conventional PI controllers

### Purpose:

This study aims to increase system efficiency and improve output voltage regulation by reducing the losses of the DC-DC boost converter in the power conversion.

### Theory and Methods:

The closed-loop transfer function of the proposed SFPI controller is obtained, and the design parameters are calculated by examining the small-signal model for stability analysis. The input-output relationship of the designed prototype converter is verified by the black box modelling method. Laboratory test results from the prototype of the transducer are tested at variable switching frequencies of the transducer up to 100 kHz and over a wide load range.

### Results:

A real-time application has verified that the proposed controller compared to conventional PI controllers, the voltage signal at the system output shortened the rise time by %8,39, the settlement time by %74,17 and improved the overshoot by 79,91%. The highest efficiency of the converter is obtained as 92.9% at 50 W load 50 kHz nominal switching frequency.

### Conclusion:

The boost DC-DC converter based on a SFPI controller is designed. The proposed SFPI controller is examined in terms of performance criteria compared to the traditional PI controller. Simulation and experimental studies have been carried out for many scenarios against input voltage and load variation. Experimental results confirm the simulation studies and the performance of the proposed controller is superior to the traditional PI controller.



## Kendinden ayarlı bulanık PI denetleyici tabanlı DA-DA dönüştürücü tasarımı ve deneysel uygulaması

Ahmet Kaysal<sup>1\*</sup>, Selim Köroğlu<sup>2</sup>, Yüksel Oğuz<sup>3</sup>, Kübra Kaysal<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, 03200, Afyonkarahisar, Türkiye

<sup>2</sup>Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 20160, Denizli, Türkiye

<sup>3</sup>Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 03200, Afyonkarahisar, Türkiye

### Ö N E Ç İ K A N L A R

- DA-DA dönüştürücü için kendinden ayarlı bulanık PI denetleyici tasarımı
- Kendinden ayarlı bulanık PI ile geleneksel PI denetleyicinin performans karşılaştırması
- DA-DA dönüştürücünün yük ve frekans değişimlerine bağlı performans analizi

### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 19.05.2020

Kabul: 12.02.2022

### DOI:

10.17341/gazimmfd.739775

### Anahtar Kelimeler:

Bulanık denetleyici,  
DA-DA güç dönüştürücüsü,  
darbe genişlik modülasyonu,  
görev oranı

### ÖZ

kapalı çevrim transfer fonksiyonu elde edilmiş ve kararlılık analizi için küçük işaret modeli incelenerek tasarımı gerçekleştirilmiştir. Giriş-çıkış ilişkisi kara kutu modelleme ile doğrulanmıştır. Sistemin farklı anahtarlama frekanslarında 20 kHz ile 100 kHz aralığındaki davranışları incelenmiştir. Tasarlanan DA-DA dönüştürücünün denetimi ilk olarak geleneksel PI denetleyici ile gerçekleştirilmiştir. PI denetleyicide sistemin giriş gerilimi ve yük değişimlerine karşı gerilim regülasyonunun performansı yetersiz olduğu gözlenmiştir. Bu nedenle dönüştürücünün çıkış gerilim regülasyonunu iyileştirmek için KA-PI denetleyici önerilmiştir. Önerilen KA-PI ile PI denetleyiciler yükselme zamanı, yerleşme zamanı ve aşma gibi performans kriterleri ile karşılaştırılmıştır. Analiz sonuçlarına göre önerilen denetleyici ve sönümlenme devrelerinin tasarlanması ile güç dönüşümündeki kayıpların azaltılarak sistem veriminin iyileştirildiği gözlenmiştir. Prototipi gerçekleştirilen dönüştürücünün nominal gerilimi 48 V, nominal gücü 100 W olup bu durumda ölçülen verim %89,57'dir. DA-DA yükselten dönüştürücünün pik verimi ise %92,9 olarak elde edilmiştir. Sistemin analiz ve benzetim sonuçları deneysel sonuçlarla doğrulanmıştır.

## Design and experimental implementation of DC-DC converter based self-tuning fuzzy PI controller

### H I G H L I G H T S

- Self-tuning fuzzy PI controller design for a DC-DC converter
- Performance comparison between the self-tuning fuzzy PI controller and conventional PI controller
- Performance analysis of DC-DC converter depending on load and frequency changes

### Article Info

Research Article

Received: 19.05.2020

Accepted: 12.02.2022

### DOI:

10.17341/gazimmfd.739775

### Keywords:

Fuzzy controller,  
DC-DC power converters,  
pulse width modulation,  
duty cycle

### ABSTRACT

In this study, self-tuning fuzzy PI (SFPI) controller-based DC-DC boost converter topology is presented. The closed-loop transfer function of the converter was obtained, and its design was performed by examining the small-signal model for stability analysis. The input-output relationship has been verified by black-box modelling. The system's behaviours between 20 kHz and 100 kHz at different switching frequencies were examined. The control of the designed DC-DC converter was first performed with a conventional PI controller. It has been observed that the performance of the voltage regulation against the input voltage and load changes of the system in the PI controller is insufficient. Therefore, SFPI controller is proposed to improve the output voltage regulation of the converter. With the proposed SFPI, the PI controllers were compared with performance criteria such as rise, settlement, and overshoot. According to the results of the analysis, it was observed that the system efficiency was improved by reducing the losses in power conversion by designing the proposed controller and snubber circuits. The nominal voltage of the prototype converter is 48 V, and the power is 100 W; in this case, the measured efficiency is 89.57%. The peak efficiency of the DC-DC converter was 92.9%. Experimental results confirmed the analysis and simulation results of the system.

\*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : \*akaysal@aku.edu.tr, skoroglu@pau.edu.tr, yukseloguz@aku.edu.tr, kkaysal@aku.edu.tr / Tel: +90 272 218 2406

## 1. Giriş (Introduction)

Son yıllarda çevre dostu, temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgi artmaktadır. Ancak birçok yenilenebilir enerji kaynağı doğası gereği kesikli rejime sahiptir. Bu nedenle güç üretimi sürekli değişmekte olup çıkış gerilimi ve frekansta kararsızlıklara neden olmaktadır [1]. Bu kararsız durumların üstesinden gelmek için güç elektroniği dönüştürücü topolojileri kaynak ile yük arasında ara yüz olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [2]. Enerji kaynaklarının etkin bir şekilde kullanılması ve verimli enerji dönüşümü dönüştürücü tasarımında önemli parametreler haline gelmiştir [3, 4].

Günümüzde araştırmacılar, endüstriyel uygulamalarda değişken giriş gerilimi ve güce karşı en iyi anahtarlama yöntemini kullanarak yüksek verimde güç elde etmeyi amaçlamaktadırlar. Son araştırmalar, dönüştürücülerin dinamik performansına doğrusal olmayan denetim ilkelerini uygulamaya yöneliktir. DA-DA dönüştürücülerin dinamik davranışını iyileştirmek ve verimini arttırmak için çeşitli denetim teknikleri ve topolojiler kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır. Geleneksel PI-PID denetleyiciye [5-7] alternatif olarak bulanık mantık denetim [8, 9], model öngörülmesi denetim [10-13], kayan kipli denetim [14, 15], sezgisel algoritmaya dayalı denetim [16], uyarlamalı sinirsel bulanık denetim [17, 18], kendinden ayarlı bulanık denetim [19-21] ve yapay sinir ağına dayalı denetim [22] gibi teknikler yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Yükselten dönüştürücülerin denetiminde deneyim ve sezgisel akıl yürütmeye dayalı bir dizi dilsel kuralın yer aldığı bulanık denetim algoritmaları yaygın olarak kullanılmaktadır. Özdemir vd. [23], fotovoltaik (PV) sistemler için yüksek kazanç oranına sahip kvadratik yükselten dönüştürücü tasarımı sunmuşlardır. Fotovoltaik dizilerin enerji dönüşümündeki verimini arttırmak için bulanık mantık tabanlı maksimum güç noktası takibi (MPPT) algoritması kullanılmıştır. Benzer şekilde gerilim sinyalindeki harmonikler uyarlanabilir bulanık P&O algoritması kullanılarak azaltılabilir [24]. Mikro şebeke yapılarında karşımıza çıkan dağıtık üretim birimlerinin çıkış gerilimi yükselten dönüştürücüler sayesinde istenilen DA bara gerilimine uygunlaştırılabilir [25]. Hibrit PV ve yakıt hücresi (FC) sistemlerini entegre eden bir uygulamada çok seviyeli yükselten dönüştürücüler, çok seviyeli invertörlerin giriş katı olarak kullanılmıştır [26]. Ushakumari vd. [27], kayan kipli ve bulanık mantık denetleyici tekniklerini kullanarak DA-DA yükselten ve azaltan-yükselten dönüştürücü tasarımı önermişlerdir. Güç dönüştürücüler, farklı işletme koşulları altında test edilmiş ve her iki denetleyici tekniği de kararlılığını sürdürdüğü gözlenmiştir.

Anahtarlama DA-DA dönüştürücülerde doğru akımı bir düzeyden diğerine dönüştürmek için bir yada daha fazla anahtar kullanılmaktadır. Verilen bir giriş gerilim değeri için DA-DA dönüştürücüde çıkış gerilimi, anahtarlama elemanlarının iletim ve kesim sürelerinin denetlenmesiyle ayarlanır [28]. Çıkış gerilimini ayarlama yöntemlerinden biri sabit frekanslı anahtarlama tekniği olup anahtarların iletim zamanını ayarlanmasıyla ortalama çıkış gerilimi denetlenmektedir. Darbe genişlik modülasyonu (PWM) olarak adlandırılan bu yöntemde, anahtar çalışma oranı değiştirilir. Rex vd. [29], DA-DA yükselten dönüştürücünün güç tüketimini azaltmak için PWM tabanlı dört transistör karşılaştırıcı önermişlerdir. Önerilen tasarım kriterlerine göre yükselten dönüştürücü PWM'in 1 mW'lık düşük güç tüketimi sağladığı ve tasarım karmaşıklığını azalttığı görülmüştür. Thrimawithana vd. [30], yeni bir azaltan-yükselten denetim tekniği olarak push-pull paralel rezonans dönüştürücü önermişlerdir. Önerilen dönüştürücü, değişken görev oranlarında çalıştırılarak hem artıran hem de azaltan çevirici olarak çalıştırılması sağlanmıştır. Sistemin 50W'lık bir prototipi gerçekleştirilerek benzetim sonuçları deneysel olarak doğrulanmıştır. Öte yandan yükselten dönüştürücülerde güç faktörü düzeltme işlevinin kullanılmasıyla dönüştürücü veriminin ve dönüştürücü giriş akımındaki kalitenin artırılması amaçlanmaktadır [31-33]. DA-DA dönüştürücülerin tasarım parametrelerinin belirlenmesinde meta

sezgisel algoritmaların kullanılmasıyla devre parametreleri optimum bir şekilde hesaplanabilmektedir. Vatansver ve Kuyu [34], sekiz farklı meta sezgisel algoritma kullanarak DA-DA dönüştürücülerinin tasarım parametrelerini hızlı ve etkin bir şekilde elde etmişlerdir. Keskin vd. [35] serpiştirilmiş yükselten dönüştürücüde Tip-III denetleyicinin tasarımına bir optimizasyon yöntemine dayalı yapılandırılmış H<sub>∞</sub> sentez yaklaşımı önermişlerdir. Yapılandırılmış H<sub>∞</sub> yaklaşımı, iki serbestlik dereceli (2-DOF) denetim sistemi konfigürasyonunda Tip-III geri besleme ve ileri beslemeli denetleyicilerin optimizasyonu için uyarlanmıştır. Benzetim sonuçları, farklı bozucular altında çıkış gerilimi regülasyonu açısından önerilen yaklaşımın etkinliği ve avantajları doğrulanmıştır.

Son zamanlarda araştırmacılar, mikro şebeke entegrasyonu, şebeke bağlantılı dönüştürücüler, kesintisiz güç kaynakları ve elektrikli araç şarj istasyonları gibi geniş uygulama alanları nedeniyle yüksek giriş-çıkış oranına sahip DA-DA dönüştürücüler üzerinde çalışmalarını sürdürmektedir. Bu tür dönüştürücülerin giriş güç kaynakları, düşük çıkış gerilimine sahip PV paneller, yakıt hücreleri ve batarya paketleri oluşturmaktadır. Çoğu uygulamada yüksek çıkış gerilimine olan gereksinim yüksek kazanç ve yüksek verime sahip DA-DA dönüştürücü kullanılması gerektirir. Ancak dönüştürücüden yüksek gerilim elde edebilmek için çok sayıda batarya hücresi veya yakıt hücresi seri bağlanmalıdır. Bu durum gerilim dengeleme ve termal yönetim sorunları olmak üzere bazı dezavantajlara sahiptir. Bu nedenle gerekli gerilim kazancını elde etmek için gerilim çoklayıcı hücreler ve basamaklama gibi teknikleri birleştiren dönüştürücüler kullanılmaktadır [36]. Rezvanyavardom vd. [37], 100 kHz anahtarlama frekansı altında 40 V giriş ve 400 V çıkış gerilimi ile yüksek gerilim kazancına sahip yükselten DA-DA dönüştürücü tasarlamışlardır. Benzer şekilde Gupta vd. [38], yumuşak anahtarlama, yüksek kazançlı, dört fazlı hibrit yükselten dönüştürücü topolojisi önermişlerdir. 2,5 kW güce sahip prototip dönüştürücü 100 kHz anahtarlama frekansında 46 V girişten uygulanan DA gerilimi 850 V çıkış gerilimine dönüştürmektedir.

Literatürde DA-DA dönüştürücüler üzerine birçok nitelikli çalışma bulunmaktadır. Bu dönüştürücülerin denetiminde, uyarlanabilir sinirsel bulanık çıkarım sistemi (ASBÇS) [2], takagi-sugeno bulanık mantık denetleyici (BMD) [23], kendinden ayarlı bulanık PI denetleyici (KA-PI) [19, 21], PI denetleyici [39], gerilim geri beslemeli denetim (GBD) [40], genetik algoritma tabanlı PI denetleyici [16] gibi birçok yöntem önerilmiştir. Bu çalışmada dönüştürücü kontrolü için KA-PI denetleyici önerilmiştir. Genel olarak literatürde karşılaştırması yükselten tip dönüştürücü (YD) ile yapılmış olup azaltan-yükselten dönüştürücü (AYD) ve tek uçlu primer indüktör dönüştürücülere de (TUPID) yer verilmiştir. Önerilen yöntem tasarım, sistem ve performans parametrelerine bağlı olarak önemli bazı literatür çalışmaları ile kıyaslanmış ve karşılaştırma sonuçları Tablo 1'de verilmiştir. Önerilen dönüştürücüde kullanılan anahtarlama ve pasif eleman sayısı birçok çalışmaya göre daha azdır. Tasarlanan KA-PI dönüştürücünün pik verimi %92,9 olup kabul edilebilir verim aralığında olduğu gözlenmiştir. Önerilen denetleyici aşım, yükselme ve yerleşme zamanı gibi performans kriterleri bakımından birçok çalışmaya göre öne çıkmaktadır.

Bu çalışmada DA-DA yükselten dönüştürücü için KA-PI denetleyici tasarlanmış ve böylelikle gerilim kararlılığının iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Dönüştürücü, bozucu etkilere maruz kaldığında sistemin kararlılığını sağlayacak denetim parametrelerinin hesaplanması için küçük sinyal analizi ile transfer fonksiyonu elde edilmiştir. Kara kutu yaklaşımı kullanılarak yaklaşık matematiksel model oluşturulmuş olup hesaplanan transfer fonksiyonu elde edilen matematiksel model ile doğrulanmıştır. Modele uygulanan basamak cevabı ile geleneksel PI ve KA-PI denetleyicilerin performansları karşılaştırılmıştır. Sistemin benzetim sonuçları deneysel olarak gerçekleştirilen prototiple doğrulanmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

## 2. Da-Da Yükselten Dönüştürücünün Analizi (Dc-Dc Boost Converter Analysis)

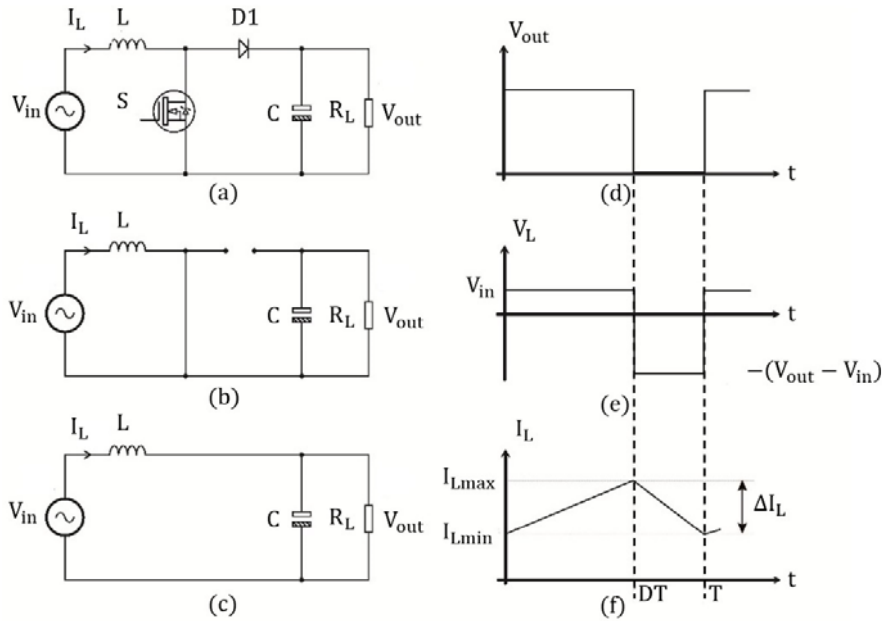
DA-DA yükselten dönüştürücü, yapısı itibarıyla basit devre tasarımı ve düşük maliyet gibi avantajlara sahiptir. Bu çalışmada ele alınan dönüştürücü devre şeması, iletim ve kesim aralıklarına bağlı eşdeğer devre şemaları ve kararlı çalışma rejimine ait dalga biçimleri Şekil 1'de verilmiştir. Dönüştürücü topolojisinde  $V_{out}$  çıkış gerilimi kalıcı durum çalışmada her zaman  $V_{in}$  giriş geriliminden daha büyüktür. Dönüştürücü sabitleri olarak  $L$  bobini,  $D_1$  diyotu,  $S$  güç anahtarını,  $C$  filtre kapasitörünü ve  $R_L$  yük direncini temsil etmektedir.  $S$  anahtarı  $f_s = 1/T$  anahtarlama frekansında çalışmakta ve anahtar iletimde iken görev oranı  $D = t_{on}/T$  ile hesaplanmaktadır. Şekil 1d'de  $0 < t < DT$  zaman aralığında, anahtar iletimdedir ve kaynak tarafından

indüktans beslenir. Şekil 1f'de görüldüğü üzere indüktanstan geçen akım lineer olarak artmakta ve buna bağlı olarak indüktansın enerji seviyesi yükselmektedir. Bu aralıkta yükün beslenmesi kondansatör tarafından sağlanır.

$t = DT$  anında tetikleme sinyali kesilen anahtar kesime girerken indüktansın ürettiği enerji ile  $D_1$  diyotu iletime girer.  $V_{in}$  giriş kaynağı ve indüktansta biriken enerji tarafından yük beslenir. İndüktanstan geçen akım lineer olarak azalır ve indüktansın enerji seviyesi düşer. Dönüştürücüde güç elemanları  $V_{out}$  çıkış gerilimine maruz kalır. Bu durumda güç elemanlarının karakteristiği çıkış gerilimine göre seçilmelidir. Şekil 1b'de görüldüğü üzere anahtar iletimdeyken  $D_1$  diyodu ters biaslanmıştır. Kirchhoff'un gerilim kanununa göre indüktör gerilimi  $V_L$ , Eş. 1 ile hesaplanırken akımın değişim oranı

**Tablo 1.** Önerilen dönüştürücü ve literatürde sunulan bazı diğer DA-DA dönüştürücüler arasındaki performans karşılaştırması  
(Performance comparison between the proposed converter and some other DC-DC converters presented in the literature)

Referans	[2]	[16]	[19]	[21]	[23]	[31]	[39]	[40]	Önerilen çalışma	
Tasarım Parametreleri	Giriş gerilimi (V)	20	18	20	15	-	80-220	110	6-23	24
	Çıkış gerilimi (V)	120	48	30-50	25	-	390	180	24	48
	Yük direnci ( $\Omega$ )	-	23	117,5	25	-	-	12,5	5,76	23
	Çıkış gücü (W)	200	50	-	-	1000	150	-	100	100
	Görev oranı (%)	-	72	50	-	-	-	-	25	53
	Anahtarlama frekansı (kHz)	100	50	10	50	-	-	40	20	50
Sistem ve Performans Parametreleri	Anahtar sayısı	2	1	2	1	1	1	1	1	1
	Diyot sayısı	3	1	2	1	3	1	1	1	1
	İndüktör sayısı	2	2	1	1	1	1	1	1	1
	Kapasitör sayısı	4	2	2	1	2	1	1	1	1
	Nominal güçte verim	-	-	-	-	-	91,82	92	73,5	92,9
	Yerleşme zamanı (s)	0,8	1,82	0,5	$1 <$	0,18	-	-	0,06 <	0,053
	Yükselme zamanı (s)	0,89	-	$\sim 0,2$	-	-	-	-	-	0,0272
	Aşma cevabı (%)	0,9	-	0	-	0	-	-	-	1,1248
	Operasyon modu	YD	TUPID	-	AYD	YD	YD	YD	YD	YD
	Denetleyici	ASBÇS	GA-PI	KA-PI	KA-PI	BMD	-	PI	GBD	KA-PI
Deneysel çalışma	Var	Yok	Var	Var	Var	Var	Var	Var	Var	



**Şekil 1.** (a) Dönüştürücü eşdeğer devresi (Converter equivalent diagram), (b) Anahtar devrede iken (When switch is ON), (c) Anahtar kesimde iken (When switch is OFF), (d) PWM sinyali (PWM command signal), (e) İndüktör gerilimi dalga formu (Inductor voltage waveform), (f) İndüktör akımı dalga formu (Inductor current waveform)

sabit ve lineer bir şekilde arttığından indüktör akımındaki değişim  $\Delta i_L$ , Eş. 2 ile hesaplanır.

$$V_L = V_{in} = L \frac{di_L}{dt} \quad (1)$$

$$(\Delta i_L)_{ON} = \frac{V_{in}DT}{L} \quad (2)$$

Şekil 1c'de görüldüğü üzere anahtar kesime girdiğinde  $D_1$  diyotu ileri yönde biaslanır ve indüktör için bir akım yolu sağlanır.  $V_{out}$  çıkış gerilimi sabit kabul edildiğinden indüktör üzerindeki gerilim Eş. 3 ve anahtar kesimde iken  $\Delta i_L$ , Eş. 4'te verilmiştir.

$$V_L = V_{in} - V_{out} = L \frac{di_L}{dt} \quad (3)$$

$$(\Delta i_L)_{OFF} = \frac{(V_{in} - V_{out})(1 - D)T}{L} \quad (4)$$

$T$  periyot süresi boyunca kalıcı durum çalışma için indüktör akımındaki değişim sıfır olmak zorundadır. Buna göre  $V_{out}$  çıkış gerilimi Eş. 5 kullanılarak hesaplanır.

$$V_{out} = \frac{1}{1 - D} V_{in} \quad (5)$$

### 3. Da-Da Yükselten Dönüştürücünün Tasarımı (Design of Dc-Dc Boost Converter)

Bu bölümde, analizi gerçekleştirilen dönüştürücünün tasarım parametreleri belirlenerek transfer fonksiyonu elde edilmiş, denetim yönteminin detayları ve çözüm akışı açıklanmıştır.

#### 3.1. Tasarım Parametrelerinin Belirlenmesi (Determination of Design Parameters)

Birçok uygulama için yaygın ve güvenli olarak kullanılan 48 V gerilim seviyesi yükselten dönüştürücünün çıkış gerilimi olarak belirlenmiştir. Buna göre, görev oranı  $0,15 < D < 0,85$  aralığında seçildiğinde  $V_{in}$  kaynak gerilimi  $12,5 V < V_{in} < 42,8 V$  aralığında değişir. İndüktör akımındaki değişim tüm çalışma koşulları için

ortalama indüktör akımının %20'sinden fazla olamayacağı varsayımı ile indüktör değerinin belirlenmesi Eş. 6 ile elde edilir.

$$L = \frac{V_{in}D}{\Delta i_L f_s} \quad (6)$$

Nominal yükün 100 W ve anahtarlama frekansının 50 kHz olduğu varsayımı ile her iki gerilim seviyesi için hesaplanan minimum indüktör değeri 288  $\mu$ H olarak hesaplanır. Benzer şekilde çıkış gerilimindeki dalgalanmanın %1'den fazla olamayacağı varsayımı ile kapasitör değeri Eş. 7'den elde edilir [41].

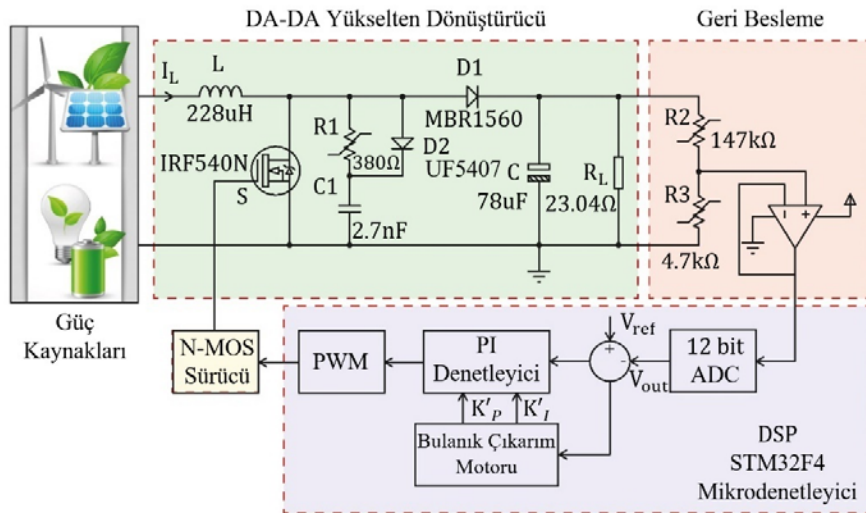
$$C = \frac{D}{\left(\frac{V_{out}}{I_{out}}\right) \left(\frac{\Delta V_{out}}{V_{out}}\right) f_s} \quad (7)$$

Buna göre  $D$ 'nin maksimum değeri kullanılarak elde edilen minimum kapasitör değeri 73,78  $\mu$ F olarak hesaplanır.

Bu çalışmada 48 V sabit çıkış gerilimine sahip 100 W'lık bir yükselten tip dönüştürücü tasarımı hedeflenmiş olup blok diyagram Şekil 2'de verilmiştir. Farklı PWM frekansı, değişken giriş gerilimi ve yüke karşılık denetleyicilerin sabit çıkış gerilimine olan etkileri incelenmiştir. Tüm bu durumlara bağlı olarak verim analizi gerçekleştirilmiş ve optimum çalışma frekansı 50 kHz olarak belirlenmiştir. Dönüştürücüye ait tasarım parametreleri Tablo 2'de verilmiştir. Anahtarlama elemanı olarak metal-oksit yarıiletken alan etkili transistör (MOSFET) kullanılmıştır.

**Tablo 2.** DA-DA Yükselten dönüştürücünün tasarım parametreleri  
(Design parameters of DC-DC Boost converter)

Tanım	Sembol	Değer
Minimum giriş gerilimi (V)	$V_{in(min)}$	12,5
Maksimum giriş gerilimi (V)	$V_{in(max)}$	42,8
Nominal çıkış gerilimi (V)	$V_{out}$	48
Maksimum çıkış akımı (A)	$I_{out}$	2,083
Maksimum çıkış gücü (W)	$P_{out}$	100
Nominal anahtarlama frekansı (kHz)	$f_s$	50
Çıkış akımındaki dalgalanma (%)	$\Delta I_{out}/I_{out}$	<20
Çıkış gerilimindeki dalgalanma (%)	$\Delta V_{out}/V_{out}$	<1
İndüktör ( $\mu$ H)	$L$	228
Kapasitör ( $\mu$ F)	$C$	73,78
Nominal yük ( $\Omega$ )	$R_L$	23,04



**Şekil 2.** DA-DA Yükselten dönüştürücünün blok diyagramı (Block diagram of DC-DC boost converter)

Son olarak dönüştürücünün iki kutup ve sağ yarı düzlemde sıfır içeren sürekli akım modu (CCM) için küçük sinyal transfer fonksiyonu Eş. 8 ile ifade edilebilir [42].

$$G(s) = \frac{\hat{V}_o}{\hat{d}} = \frac{V_{out}}{D'} \frac{\left[1 - s \left(\frac{L}{D'^2 R_L}\right)\right]}{\left(\frac{CL}{D'^2}\right) s^2 + \left(\frac{L}{D'^2 R_L}\right) s + 1} \quad (8)$$

Tablo 2'de verilen parametreler kullanılarak yükselten dönüştürücü transfer fonksiyonu elde edilmiştir. Verilen sürekli zamanlı transfer fonksiyonunun T:0,001 s örnekleme periyodu için ayrık zamanlı transfer fonksiyonu Eş. 9'da verilmiştir.

$$G(z) = \frac{6,823z - 0,8445}{z^2 + 1,434z + 0,5553} \quad (9)$$

### 3.2. PI denetleyici tasarımı (PI Controller Design)

PI denetleyici, geri besleme verisinin referans değerinden çıkartılması ile elde edilen hatayı oransal ve integral etkisinde paralel olarak işleyerek, sistemin istenen referans değerine oturmasını sağlayan bir denetim yöntemidir. Aynı zamanda geri beslemeli denetim sistemleri arasında en yaygın olarak kullanılmaktadır [43]. PI denetleyici, referans ile ölçülen değer arasındaki hatayı zamanla azaltarak sistemin referans değerine ulaşmasını sağlamanın yanı sıra aşım, oturma zamanı ve yükselme zamanı gibi sistem davranışları açısından önemli parametreleri transfer fonksiyonlarını kullanarak istenilen seviyelerde tutmak için de tasarlanabilir.

DA-DA yükselten dönüştürücünün geri beslemeli kapalı çevrim transfer fonksiyonu ve Ziegler-Nichols yöntemi kullanılarak PI denetleyici parametreleri elde edilmiştir [44]. Parametrelerin elde edilmesinde integral zaman sabiti  $\infty$ , türev zaman sabiti de 0 olarak ayarlanarak integral ve türev işlemleri devre dışı bırakılmıştır. Sistem cevabının kararlılık sınırı içerisinde ulaştığı maksimum salınım dikkate alınarak salınım periyodu elde edilmiş ve böylece oransal ve integral katsayılar belirlenmiştir. Bu çalışmada PI denetleyici için en uygun oransal katsayı 0,0736, integral katsayısı ise 0,6053 olarak bulunmuştur.

### 3.3. Kendinden Ayarlı Bulanık PI Denetleyici Tasarımı (Self-tuning Fuzzy PI Controller Design)

Gerilim regülasyonunun kararlı bir şekilde ayarlanabilmesi için basit ve verimli olan doğrusal olmayan bulanık mantık denetim tekniği

kullanılmıştır. Denetleyici, 48 V'luk çıkış gerilimini değişken bozucular altında sabit tutarak talep edilen gücü sağlamalıdır. Tasarlanan KA-PI denetleyicinin performansını gözlemlemek için referans değeri ile elde edilen dönüştürücü transfer fonksiyonu çıkışının karşılaştırılması gerekmektedir. Geleneksel PI ve KA-PI denetleyicilerin değişken referans girişe olan tepkileri incelemek için Şekil 3'te verilen benzetim modeli oluşturulmuştur.

Önerilen denetleyicide gerilim regülasyonu hatası ( $e$ ) ve hatanın değişimini ( $\Delta e$ ) değerlendiren Mamdani yapısındaki bulanık sistemin oransal (P) ve türev (D) kazanç katsayılarına sahip iki girişi ve optimum PI kazanç katsayılarının belirlenmesinde çarpan olarak kullanılan iki çıkışı bulunmaktadır. Gerilim regülasyonu hatası ve hatanın değişimi Eş. 10 ve Eş. 11'de ifade edilmiştir.

$$e(t) = V_{ref}(t) - V_{out}(t) \quad (10)$$

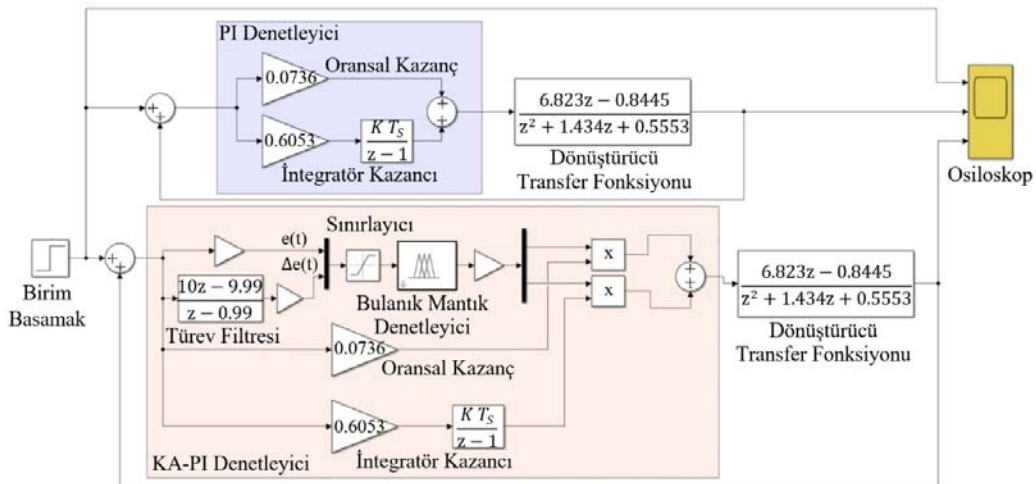
$$\Delta e(t) = e(t) - e(t-1) \quad (11)$$

Tasarlanan bulanık mantık denetleyiciye ait blok diyagram Şekil 4'te verilmiştir. Bulanık denetleyici, giriş-çıkış üyelik fonksiyonları, bulanık kurallar kümesi, bulanık çıkarım motoru ve durulaştırıcı olmak üzere dört ana unsurdan oluşmaktadır. Üçgen, yamuk, çan eğrisi, gauss ve sigmoid olmak üzere çok sayıda üyelik fonksiyonu bulunmaktadır. Bu çalışmada Şekil 4'te görülen üçgen üyelik fonksiyonlarından yararlanılmıştır. Bu fonksiyon tipinde başlangıç (a), bitiş (c) ve en çok üyelik derecesine sahip olunan (b) olmak üzere üç parametre bulunmaktadır ve Eş. 12 ile hesaplanmaktadır.

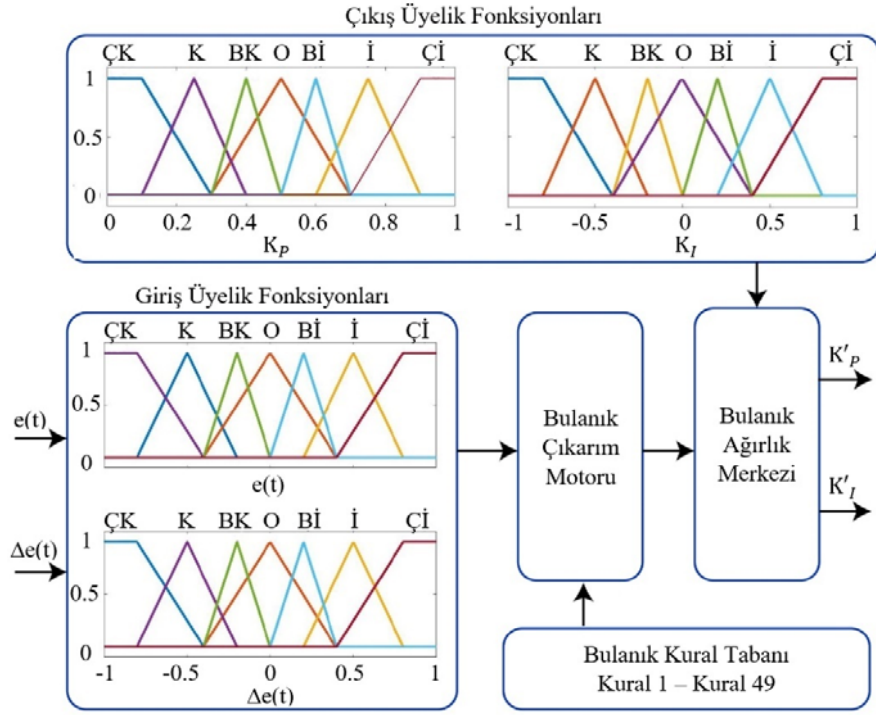
$$\mu(x; a, b, c) = \begin{cases} a < x < b \rightarrow \frac{(x-a)}{(b-a)} \\ b < x < c \rightarrow \frac{(c-x)}{(c-b)} \\ x < a \text{ or } x > c \rightarrow 0 \end{cases} \quad (12)$$

Bulanık kural tabanı birimi içerisinde, giriş biriminde olan verilerin çıkış değişkenleri ile ilişkilendiren mantıksal *eğer-ise* kuralları bulunmaktadır. Bu kurallar, problem uzayında girişlerin olması gereken çıktılarını mantıksal olarak ilişkilendirir. Karar mekanizması için bulanık içermeler kullanılmaktadır.

Bulanık halde olan sayıyı gerçek sayıya dönüştürme süreci ise durulaştırma olarak tanımlanır. Durulaştırma işleminde kullanılan ağırlık merkezi yöntemi Eş. 13'te verilmiştir.



Şekil 3. Önerilen KA-PI denetleyici ve geleneksel PI denetleyicinin benzetim modeli (Simulation model of proposed SFPI controller and conventional PI controller)



Şekil 4. Bulanık mantık tabanlı sistemin blok diyagramı (Block diagram of fuzzy logic based system)

Bir bulanık denetim kuralı “eğer  $e(t)$  ÇK ve  $\Delta e(t)$  O ise  $K_p$ , İ ve  $K_I$ , K” şeklinde gösterilmektedir. Diğer tüm durumlar Tablo 3’te verildiği şekilde tanımlanmaktadır. Böylelikle önerilen bulanık kurallar dizisinin 49 farklı bulanık kuralı vardır. Şekil 4’te gösterilen dilsel değişkenler için Ç çok, B biraz anlamına gelir. Ayrıca sırasıyla O, K, İ, orta, kötü ve iyi ifade eder.

Tablo 3. Bulanık kurallar kümesi (Set of fuzzy rules) (a)  $K_p'$  ve (b)  $K_I'$

	$e \setminus \Delta e$	ÇK	K	BK	O	Bİ	İ	Çİ
(a)	ÇK	Çİ	Çİ	Çİ	İ	İ	Bİ	O
	K	Çİ	Çİ	Çİ	İ	Bİ	O	BK
	BK	Çİ	İ	İ	Bİ	O	BK	K
	O	Çİ	İ	Bİ	O	BK	K	ÇK
	Bİ	İ	Bİ	O	BK	K	ÇK	ÇK
	İ	Bİ	O	BK	K	ÇK	ÇK	ÇK
	Çİ	O	BK	K	K	ÇK	ÇK	ÇK
	ÇK	ÇK	K	BK	O	Bİ	İ	Çİ
(b)	K	ÇK	ÇK	ÇK	K	K	BK	O
	BK	ÇK	ÇK	ÇK	K	BK	O	Bİ
	O	ÇK	K	K	BK	O	Bİ	İ
	Bİ	ÇK	K	BK	O	Bİ	İ	Çİ
	İ	K	BK	O	Bİ	İ	Çİ	Çİ
	Çİ	BK	O	Bİ	İ	Çİ	Çİ	Çİ
	ÇK	O	Bİ	İ	İ	Çİ	Çİ	Çİ

$$x_{COG}^* = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \cdot \mu(x_i)}{\sum_{i=1}^n \mu(x_i)} \quad (13)$$

Eşitlikte  $x_i$   $i_{th}$  bulanık kuralın çıkışı,  $\mu(x_i)$   $i_{th}$  bulanık kuralın çıkarım sonucu,  $x_{COG}^*$  bulanık denetleyicinin çıkışıdır. Son aşamada bulanık denetleyiciden oransal kazanç  $K_p'$  ve integral kazanç  $K_I'$  çıkışları elde edilmiştir. Bu denetim katsayıları ile PI denetleyici katsayıları çarpılmış ve optimum denetleyici parametreleri sisteme

uygulanmıştır. KA-PI denetleyicinin parametreleri Eş. 14 ve Eş. 15’e göre güncellenir.

$$K_p = K_{p0} * K_p' \quad (14)$$

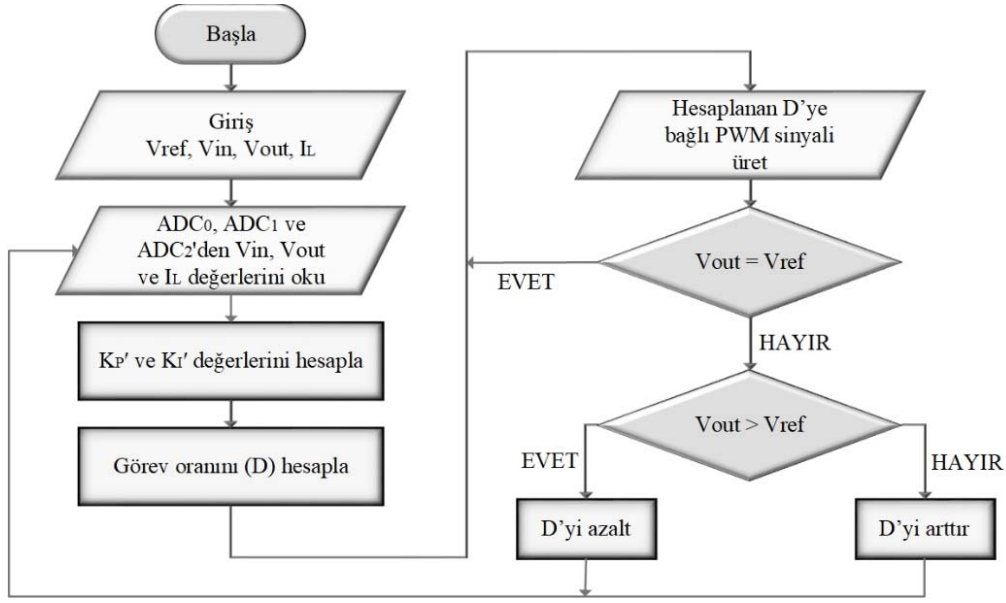
$$K_I = K_{I0} * K_I' \quad (15)$$

Burada  $K_{p0}$  geleneksel PI denetleyicinin başlangıç oransal kazancını ve  $K_{I0}$  başlangıç integral kazancını temsil etmektedir. DA-DA yükselten dönüştürücünün denetimini sağlayan mikrodenetleyici Şekil 5’te verilen akış diyagramına göre işletilmektedir.

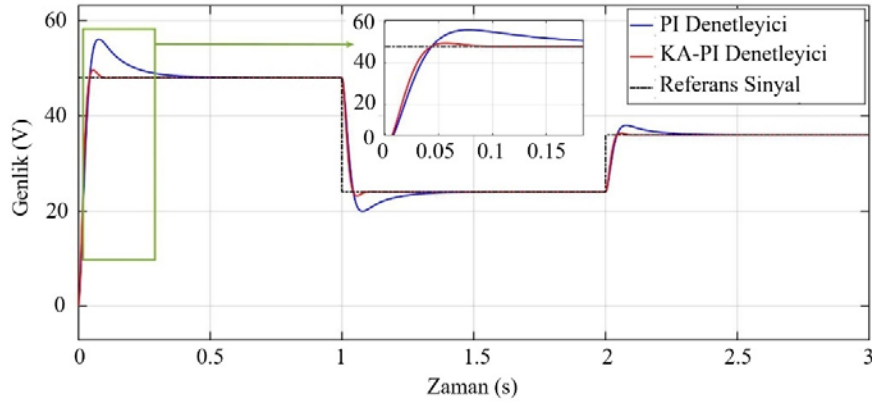
#### 4. Sonuçlar Ve Tartışmalar (Results And Discussions)

##### 4.1. Benzetim Sonuçları (Simulation Results)

Bu çalışmada DA-DA yükselten tip dönüştürücü transfer fonksiyonu elde edilmiş ve sistemin performans analizine ilişkin benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Dönüştürücü yapısında KA-PI denetleyici tasarlanmış, basamak fonksiyonu şeklindeki referans sinyale karşı denetleyici performansını incelenmiştir. Güç dönüştürücüsünün gerilim kararlılığı ve denetleyici performansı geleneksel PI denetleyici ile karşılaştırılmıştır. Denetleyicilerin referans sinyale olan karşılaştırmaları Şekil 6’da performans analizlerinin sonuçları ise Tablo 4’te verilmiştir. Denetleyicilerin basamak cevabına olan tepkisi incelendiğinde önerilen KA-PI denetleyicinin yükselme zamanı, aşma ve yerleşme zamanlarında geleneksel PI denetleyiciye göre daha iyi bir performans sergilediği Şekil 6’dan açıkça görülmektedir. Önerilen denetleyici, PI denetleyicinin aşım cevabını  $0 < t < 1$ ,  $1 < t < 2$  ve  $2 < t < 3$  zaman aralıklarında sırasıyla %79,91, %80,06 ve %79,76 olarak iyileştirmiştir. Benzer şekilde yükselme zamanını aynı zaman aralıklarında sırasıyla %8,39, %8,72, %9,03 ve yerleşme zamanını sırasıyla %74,17, %74,94, %74,14 olarak iyileştirmiştir. Denetim metodlarının karşılaştırmalı performans analizi Tablo 4’te verilmiştir. DA-DA yükselten dönüştürücüde önerilen denetleyici yapısının



Şekil 5. Mikrodenetleyici tarafından işletilen algoritmanın akış diyagramı (Flow chart of the algorithm operated by microcontroller)



Şekil 6. Sistemin basamak cevabına olan tepkisi (The response of the system to the step response)

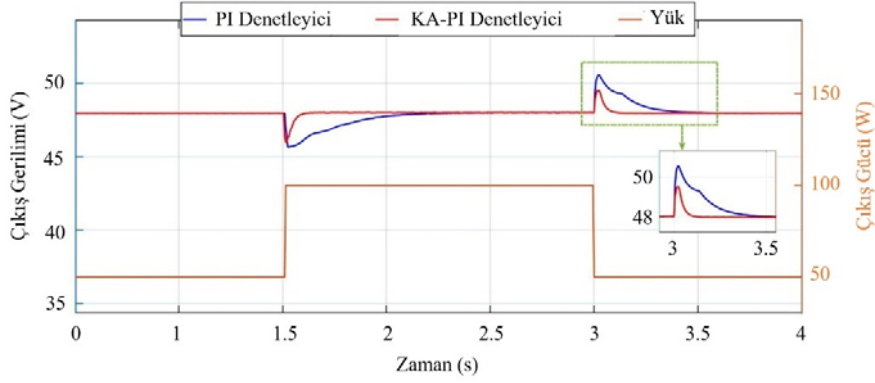
Tablo 4. Denetim metotlarının performans analizi (Performance analysis of control methods)

Denetim aralığı	Parametre	PI	KA-PI	İyileşme oranı (%)
0<t<1	Aşma (%)	16,6471	3,3446	79,91
	Yükselme zamanı (s)	0,0298	0,0273	8,39
	Yerleşme zamanı (s)	0,2757	0,0712	74,17
1<t<2	Aşma (%)	16,8755	3,3644	80,06
	Yükselme zamanı (s)	0,0298	0,0272	8,72
	Yerleşme zamanı (s)	0,2845	0,0713	74,94
2<t<3	Aşma (%)	5,5561	1,1248	79,76
	Yükselme zamanı (s)	0,0299	0,0272	9,03
	Yerleşme zamanı (s)	0,2757	0,0713	74,14

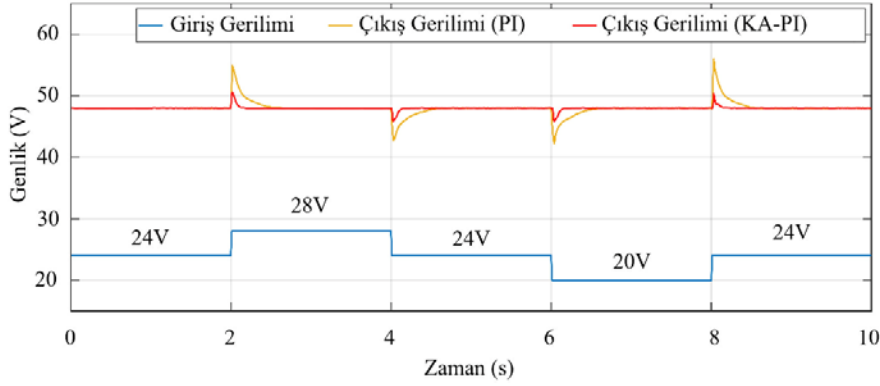
dinamik cevabını doğrulamak amacıyla yük ve giriş geriliminin değişimi senaryoları uygulanmıştır. DA-DA dönüştürücüye ait benzetim çalışmalarında ilk olarak PI ve KA-PI denetleyicilerin yük değişimine olan tepkileri incelenmiştir. Mevcut yükü 50 W olan dönüştürücüye 1,5. s'de 50 W'lık bir yük ilave edilmiş ve 3. s'de bu yük kaldırılmıştır. Şekil 7'de görülen benzetim sonuçları incelendiğinde KA-PI denetleyicinin PI denetleyiciye göre aşım cevabı ve yerleşme zamanı 1,5<t<3 ve 3<t<4 zaman aralıkları için incelenmiştir. Örnek olarak 3. s'de ani olarak gerçekleşen yük değişimi sonrası KA-PI denetleyicinin PI denetleyiciye göre karşılaştırma parametrelerinden aşım cevabını %39,92 ve yerleşme zamanını %82,02 olarak iyileştirdiği görülmüştür. Benzer şekilde

DA-DA dönüştürücüde işletilen PI ve KA-PI denetleyicilerin giriş geriliminin değişimine olan tepkileri incelenmiştir. Nominal giriş gerilimi, 2. s'de 28 V'luk gerilim seviyesine yükseltilmiş ve 6. s'de 20 V'luk gerilim seviyesine düşürülerek benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Şekil 8'de görülen benzetim sonuçları incelendiğinde KA-PI denetleyicinin PI denetleyiciye göre aşım cevabı ve yerleşme zamanı 2<t<4, 4<t<6, 6<t<8 ve 8<t<10 zaman aralıkları için incelenmiştir. Örnek olarak 2. s'de DA-DA dönüştürücünün giriş gerilim seviyesi 24 V'tan 28 V'a ani olarak yükseltildiğinde KA-PI denetleyicinin PI denetleyiciye göre karşılaştırma parametrelerinden aşım cevabını %58,69 ve yerleşme zamanını %73,24 olarak iyileştirdiği görülmüştür.





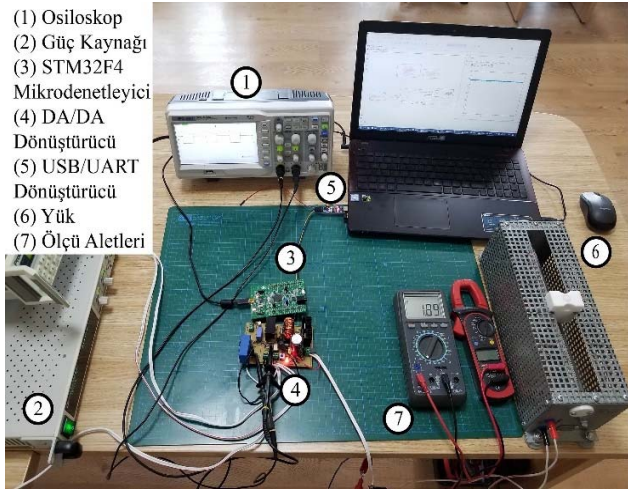
Şekil 7. DA-DA dönüştürücü de kullanılan PI ve KA-PI denetleyicilerin yük değişimine olan tepkisi (Response of PI and SFPI controllers used in DC-DC converter to load change)



Şekil 8. DA-DA dönüştürücüde kullanılan PI ve KA-PI denetleyicilerin giriş geriliminin değişimine olan tepkisi (The response of the PI and SFPI controllers used in the DC-DC converter to the change of input voltage)

#### 4.2. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

Önerilen KA-PI denetleyicinin performansını doğrulamak için 100 W'lık bir prototip dönüştürücü deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Sisteme ait deney düzeneği Şekil 9'da verilmiştir. Denetim eylemleri STM32F407VG mikrodenetleyicisi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. DA-DA yükselten dönüştürücü çıkış karakteristikleri Matlab/Simulink ortamında STM32 blok setleri kullanılarak emüle edilmiştir.

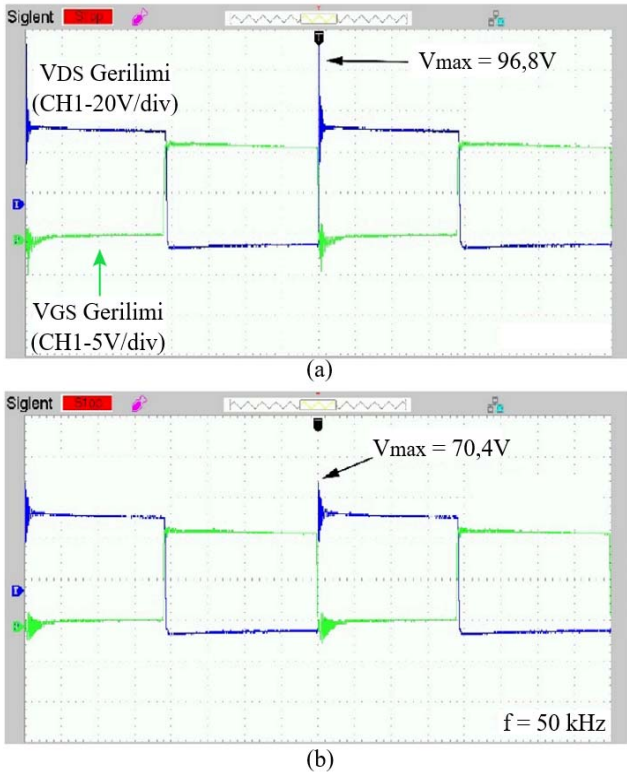


Şekil 9. Sistemin donanım kurulumu (The hardware setup of the system)

Anahtarlama esnasında, anahtarlama elemanının kanal-kaynak (drain-source) uçlarında oluşan yüksek değerli pik gerilimlere ( $V_{DS}$ ) maruz kalmaması için sönümlenme devresi tasarlanmıştır. MOSFET'e uygulanan farklı anahtarlama frekansları için farklı sönümlenme devre parametreleri hesaplanmıştır. Bu sayede MOSFET'in aşırı ısınmasının önüne geçilmesiyle verim artırılmış ve MOSFET üzerindeki gerilim stresi azaltılmıştır. DA-DA yükselten dönüştürücünün 50 kHz anahtarlama frekansı ve nominal yüklenme durumu için anahtarlama sinyali ve gerilim stresleri incelenmiştir. Sönümlenme devresi bulunmayan durum Şekil 10a'da, sönümlenme devresi tasarlanmış durum için Şekil 10b'de anahtarlama sinyali ve gerilim stresi değişimleri osiloskop çıktısı olarak verilmiştir. Burada  $V_{GS}$ , kapı-kaynak (gate-source) gerilimini temsil etmektedir. Sönümlenme devresi eklenmesi durumunda gerilim stresi pik değeri 96,8 V'tan 70,4 V'a düştüğü görülmüştür. Bu durumda anahtar uçlarında meydana gelen yüksek değerli pik gerilimler %27,28 oranında azaltılmıştır.

Tasarlanan dönüştürücünün tasarım parametrelerinden çıkış gerilimindeki dalgalanma oranı %1, indüktör akımındaki dalgalanma oranı %20, görev oranı aralığı ise  $0,15 < D < 0,85$  olarak belirlenmiştir. Bu durumlar deneysel sonuçlarla irdelenmiştir. İlk olarak DA-DA yükselten dönüştürücüdeki dalgalanma oranı yük altında iken, giriş gerilimine karşılık çıkış gerilimi gözlenmiştir. 100W'lık yüklenme durumunda 24 V giriş gerilimine karşılık 48 V'luk çıkış geriliminin dalgalanma değişimi Şekil 11a'da verilmiştir. Çıkış gerilimi üzerinde oluşan alternatif akım efektif dalgalanma miktarı  $V_{ripple,rms} \cong 0,06 V$  olduğu gözlenmiş olup bu değer çıkış geriliminin %0,125'i seviyesindedir. Böylece tasarım parametresi olarak belirlenen ve IEC61204 güç kaynakları çıkış gerilim

standardına [45] göre %1'lik gerilim dalgalanması sınır değerinin çok altında kaldığı gözlemlenmiştir. Dolayısıyla bu sonuç, uluslararası standartları karşılar nitelikte olduğunu göstermektedir. İkinci olarak indüktör akımının dalgalanma oranı yüzdesi deneysel olarak irdelenmiştir. Anahtarlama frekansı 50 kHz iken indüktör akımındaki değişim Şekil 11b'de görülmektedir. İndüktör akımının değişim hızı sabit olduğundan akım doğrusal olarak değişmektedir. Bu anahtarlama frekansında indüktör akımındaki dalgalanma miktarı  $\Delta I_L = 830 \text{ mA}$  iken 100 kHz'de  $\Delta I_L = 560 \text{ mA}$  olarak ölçülmüştür. İndüktör akımının dalgalanma oranı 50 kHz anahtarlama frekansı için %19,9, 100 kHz için ise %13,43 olarak elde edilmiştir. Bu değer tasarım parametresi olarak belirlenen ortalama indüktör akımının altındadır. Son olarak dönüştürücünün maksimum yük altında iken görev oranı aralığı belirlenen kısıtlar içerisinde sınırlandırılmıştır. Bu durumda dönüştürücüye uygulanan giriş gerilimi  $12,5 \text{ V} < V_{in} < 42,8 \text{ V}$  aralığında uygulanmış ve dönüştürücüden 48 V kararlı bir çıkış gerilimi elde edilmiştir.



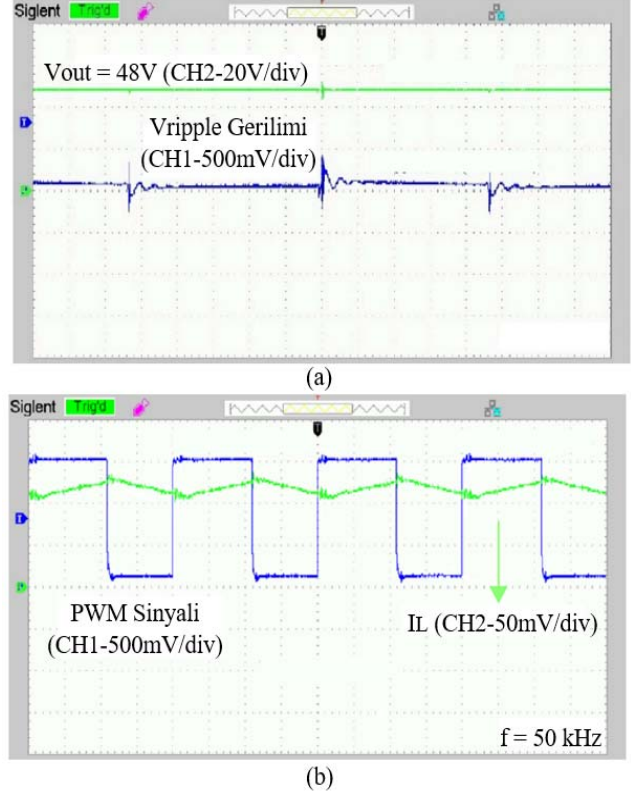
**Şekil 10.** (a) Sönümlenme devresi kullanılmadan önceki  $V_{DS}$  gerilimi (CH1) ve MOSFET'e uygulanan anahtarlama sinyali (CH2) ( $V_{DS}$  voltage before using the snubber circuit (CH1) and switching signal applied to the MOSFET (CH2))  
(b) Sönümlenme devresi kullanıldıktan sonraki  $V_{DS}$  gerilimi (CH1) ve MOSFET'e uygulanan anahtarlama sinyali (CH2) ( $V_{DS}$  voltage after using the snubber circuit (CH1) and switching signal applied to the MOSFET (CH2))

Tasarım performans kriterleri arasında oldukça önemli parametrelere bir diğeri dönüştürücü verimidir. Bu nedenle yükselten dönüştürücünün verimi hem analitik olarak hesaplanmış hem de deneysel olarak ölçülmüştür. Devre elemanlarının teknik özellikleri kullanılarak (Tablo 5) ve Eş. 16-Eş. 18'den analitik olarak her bir devre elemanı üzerinde oluşan ve toplam güç kaybını hesaplamak mümkündür [46].

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss}} \quad (16)$$

$$P_{loss} = P_{rDS} + P_{sw} + P_D + P_{rL} + P_{rC} \quad (17)$$

$$P_{loss} = \left[ \frac{r_L + D r_{DS}}{(1-D)^2 R_L} + \frac{R_F + D r_C}{(1-D) R_L} + \frac{V_F}{V_{out}} + f_s C_o R_L \right] P_{out} \quad (18)$$

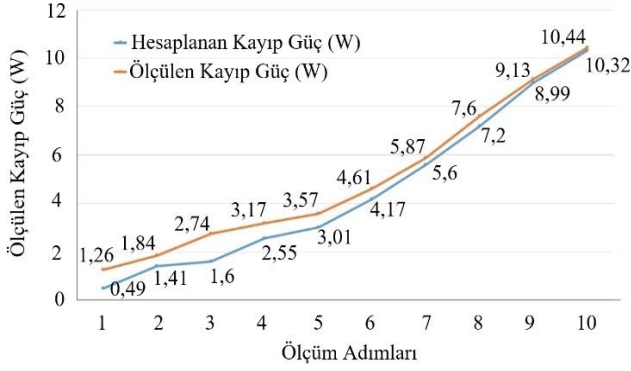


**Şekil 11.** (a) Çıkış gerilim sinyali; AA mod (CH1), DA mod (CH2) (Output voltage signal; AC mode (CH1), DC mode (CH2))  
(b) PWM anahtarlama frekansı (CH1), indüktör akımının değişimi (CH2) (PWM switching frequency (CH1), change of inductor current (CH2))

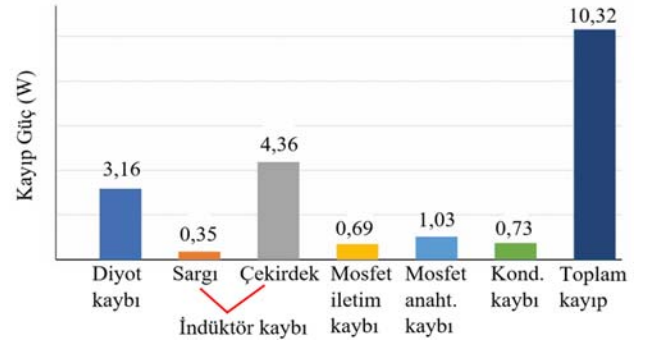
**Tablo 5.** Devre elemanlarının teknik özellikleri  
(Technical characteristics of circuit elements)

Tanım	Sembol	Değer
MOSFET iletim direnci ( $\Omega$ )	$r_{DSon}$	0,033
Diyot ileri yön direnci ( $\Omega$ )	$R_F$	0,05
Diyot eşik gerilimi (V)	$V_F$	1,5
İndüktörün ESR değeri ( $\Omega$ )	$r_L$	0,39
Filtre kapasitörünün ESR değeri ( $\Omega$ )	$r_C$	0,12
MOSFET çıkış kapasitansı (pF)	$C_o$	295

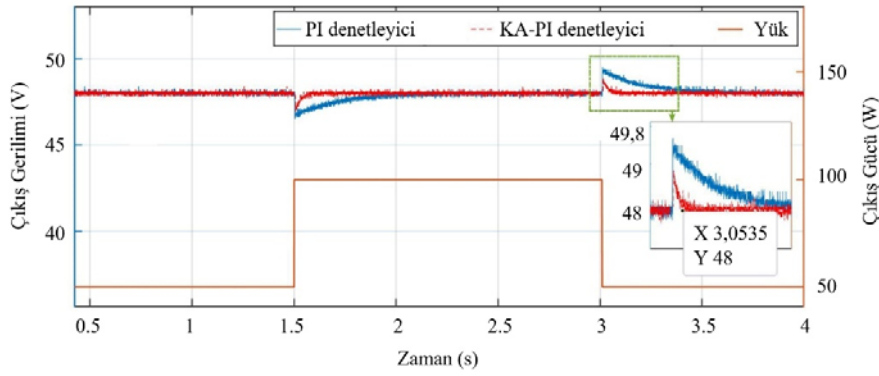
Dönüştürücünün giriş gerilimi 24 V, çıkış gerilimi 48 V, anahtarlama frekansı 50 kHz iken yaklaşık 10 W'lık yük artışlarına bağlı kayıp güçler analitik olarak hesaplanmıştır. Dönüştürücüye ait hesaplanan ve ölçülen kayıp güçler Şekil 12'de verilmiştir. Hesaplanan ve ölçülen değerlerin birbirini doğruladığı bu şekilden açıkça görülmektedir. DA-DA dönüştürücünün 100 W yük altındayken devre elemanları üzerindeki kayıplar analitik olarak hesaplanmış ve Şekil 13'te verilmiştir. Buna göre toplam güç kaybının %45,59'u indüktör üzerinde gerçekleşirken %30,64'ü diyot üzerinde gerçekleşmiştir. Ayrıca görev oranının artmasıyla yükselten dönüştürücünün veriminin düşeceği göz önünde bulundurulmalıdır [28]. Öyle ki maksimum yük altında görev oranının %85 olduğu anda verim %59,8 olarak ölçülmüştür. En yüksek verim %92,9 olarak görev oranı %53,9'da elde edilmiştir.



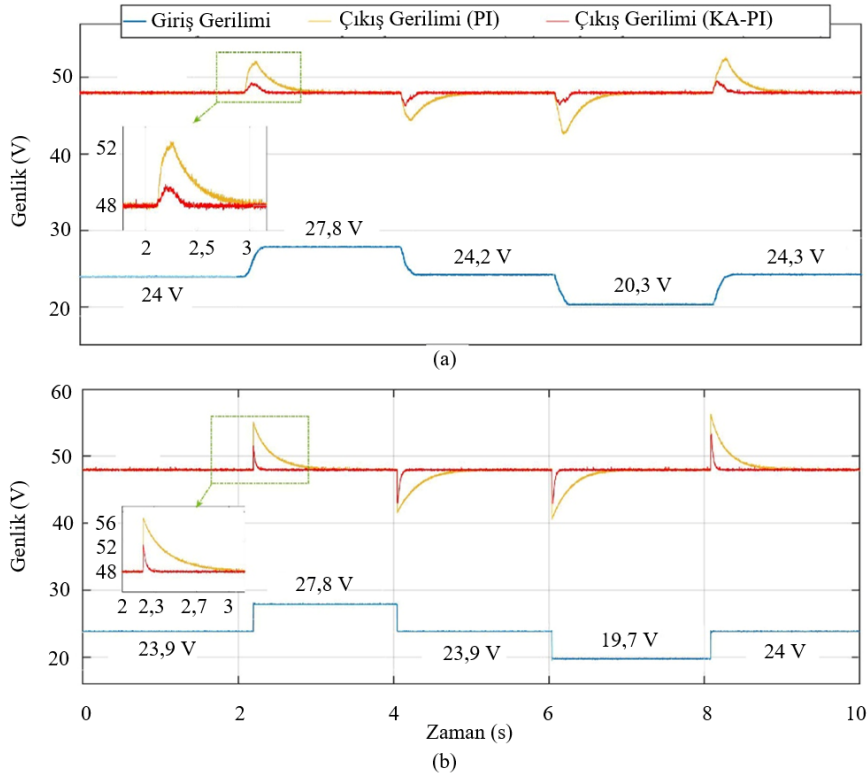
Şekil 12. Ölçülen ve hesaplanan kayıp güç değerleri (Measured and calculated loss power values)



Şekil 13. DA-DA dönüştürücü nominal gerilim ve yük altındayken devre elemanlarında oluşan kayıplar (Losses in-circuit elements when DC-DC converter is under nominal voltage and load)



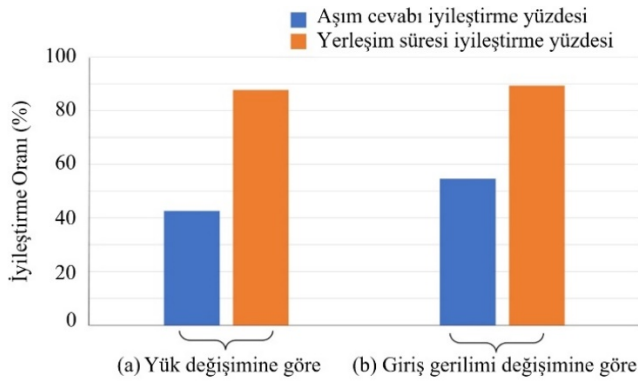
Şekil 14. KA-PI denetleyicinin bozucu etki sonrası tepkisi (Response of SFPI controller after disturbing effect)



Şekil 15. Giriş gerilimindeki değişime karşılık denetleyicilerin tepkisi (Response of controllers to change in input voltage) (a) Rampa giriş (Ramp input) (b) Basamak giriş (Step input)

Benzetim çalışmalarında olduğu gibi DA-DA yükselten dönüştürücünün dinamik davranışını doğrulamak amacıyla yük ve giriş geriliminin değişimleri gibi senaryolar deneysel çalışmalarda da gerçekleştirilmiştir. Dönüştürücüye ait deneysel çalışmalarda PI ve KA-PI denetleyicilerin yük değişimine olan tepkileri incelenmiştir. Mevcut yükü 50 W olan dönüştürücüye 1,5. s'de 50 W'lık bir yük ilave edilmiş ve 3. s'de bu yük kaldırılmıştır. USB/TTL dönüştürücü kullanılarak deneysel çalışmaya ait bütün veriler bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Şekil 14'te görülen deneysel sonuçlar incelendiğinde KA-PI denetleyicinin PI denetleyiciye göre aşım cevabı ve yerleşme zamanı  $1,5 < t < 3$  ve  $3 < t < 4$  zaman aralıkları için gözlenmiştir. Örnek olarak 1,5. s'de gerçekleşen yük değişimi sonrası KA-PI denetleyicinin PI denetleyiciye göre karşılaştırma parametrelerinden aşım cevabını %42,58 ve yerleşme zamanını %87,70 olarak iyileştirdiği görülmüştür. Önerilen denetleyici, bozucu etki sonrası meydana gelen gerilim dalgalanmasını 0,0535 s gibi kısa bir süre içerisinde referans gerilim seviyesine kararlı bir şekilde getirmiştir. Benzer şekilde DA-DA dönüştürücüde işletilen PI ve KA-PI denetleyicilerin giriş geriliminin değişimine olan tepkisi benzetim çalışmalarında olduğu gibi deneysel çalışmalarda da incelenmiştir. Benzetim çalışmasında gerçekleştirilen basamak giriş gerilim değişimine ek olarak deneysel çalışmada rampa giriş gerilim değişimi de uygulanmış ve deneysel sonuçlar Şekil 15'te verilmiştir. Şekil 15'a da rampa giriş değişimine göre elde edilen deneysel sonuçlar incelendiğinde KA-PI denetleyicinin PI denetleyiciye göre aşım cevabı ve yerleşme zamanı  $2 < t < 4$ ,  $4 < t < 6$ ,  $6 < t < 8$  ve  $8 < t < 10$  zaman aralıkları için gözlenmiştir. Örnek olarak 2,11.s'de DA-DA dönüştürücünün giriş gerilim seviyesi 24 V'tan 27,8 V'a yükseltildiğinde KA-PI denetleyicinin PI denetleyiciye göre karşılaştırma parametrelerinden aşım cevabını %67,32 ve yerleşme zamanını %73,21 olarak iyileştirdiği görülmüştür. Şekil 15b'deki basamak giriş değişimine göre 2,25. s'de 23,9 V'tan 27,8 V'a yükseltildiğinde KA-PI denetleyicinin PI denetleyiciye göre karşılaştırma parametrelerinden aşım cevabını %54,56 ve yerleşme zamanını %89,32 olarak iyileştirdiği görülmüştür.

Son olarak önerilen KA-PI denetleyicinin geleneksel PI denetleyiciye göre performans değerlendirmesi yük ve giriş gerilimi değişimlerine göre deneysel olarak ortaya konmuştur. Burada yük değişiminin 50 W'tan 100 W'a çıkarılması durumunda aşım ve yerleşme zamanı bakımından önerilen yöntemten iyileştirme yüzdeleri Şekil 16'a sunulmuştur. Şekil 16'a dan açıkça görüldüğü üzere KA-PI denetleyici PI denetleyiciye göre aşımı %42,58, yerleşme zamanını ise %87,70 olarak iyileştirmiştir. Benzer değerlendirme giriş gerilimi değişimine göre yapılmıştır. Giriş gerilimi 23,9 V'tan 27,8 V'a yükseltildiğinde aşım ve yerleşme zamanı bakımından önerilen yöntemten iyileştirme yüzdeleri Şekil 16b'de sunulmuştur. Şekil 16b'den açıkça görüldüğü üzere KA-PI denetleyici PI denetleyiciye göre aşımı %54,56, yerleşme zamanını ise %89,32 olarak iyileştirmiştir.



**Şekil 16.** PI ve KA-PI denetleyiciye ait benzetim ve deneysel sonuçlarının performans kriterleri bakımından karşılaştırılması (a) yük değişimi (b) giriş gerilimindeki değişim (Comparison of simulation and experimental results of PI and SFPI controller in terms of performance criteria (a) load change (b) input voltage change)

## 5. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada, yükselten tip DA-DA bir dönüştürücüye ait tasarım, benzetim ve gerçek zamanlı uygulama gerçekleştirilmiştir. Değişken giriş gerilimi ve yük koşulları altında çıkış geriliminin kararlılığını sağlamak ve salınımları azaltmak amacıyla KA-PI denetleyici önerilmiştir. Önerilen denetleyicinin geleneksel PI denetleyiciye göre performans değerlendirmesi yapıldığında aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- Önerilen KA-PI denetleyicinin benzetim sonuçlarından basamak cevabına olan tepkisi incelendiğinde PI denetleyiciye göre yaklaşık olarak yükselme zamanını %8,39, aşmayı %79,91 ve yerleşme zamanını %74,17 oranında iyileştirmiştir.
- Deneysel sonuçlara göre DA-DA dönüştürücünün nominal değerlerdeki dalgalanma oranı %0,125 olarak hesaplanmıştır. Bu değer %1 standart limit değerinin altında olup önerilen sistemin iyi bir performans gösterdiği gözlenmiştir.
- İndüktör akımın dalgalanma oranı 50 kHz anahtarlama frekansı için %19,9, 100 kHz için ise %13,43 olarak elde edilmiştir. Bu değer tasarım parametresi olarak belirlenen ortalama indüktör akımının altında kalmaktadır.
- Dönüştürücü giriş geriliminin sınır değerleri  $12,5 V < V_{in} < 42,8 V$  aralığı olarak belirlenmiş ve sistem bu aralıktaki giriş gerilimine karşı dönüştürücüden 48 V kararlı bir çıkış gerilimi elde edilmiştir. Bu durum benzetim ve deneysel sonuçlarda da gözlenmiştir.
- Dönüştürücü için sönümleme devresi tasarlanarak anahtarlama esnasında, anahtar uçlarında meydana gelen yüksek değerli pik gerilimler %27,28 oranında azaltılmıştır. Sönümleme devreleri ile minimize edilerek anahtarlama elemanının aşırı ısınmasının önüne geçilmiş ve böylece DA-DA yükselten dönüştürücü veriminde iyileştirmeler sağlanmıştır.
- Dönüştürücüye ait en yüksek verim %92,9 olarak 50 W yük 50 kHz nominal anahtarlama frekansında tespit edilmiştir.

Sonuç olarak KA-PI denetleyici tabanlı bir yükselten tip DA-DA dönüştürücü tasarlanmıştır. Giriş gerilimi ve yük değişimine karşı birçok senaryo için benzetim ve deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçlar benzetim çalışmalarını doğrular nitelikte olup önerilen denetleyicinin performansı geleneksel PI denetleyiciye göre daha üstündür.

## Kaynaklar (References)

1. Hema R.P., Navasree S., Saly G., Ashok S., Fuzzy logic supervisory controller for multi-input non-isolated DC-to-DC converter connected to DC grid, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 112, 49-60, 2019.
2. Umadevi K., Nagarajan C., Design and implementation of novel soft switching method-based DC-DC converter with non-isolated coupled inductor in solar system using FPGA, Microprocessors and Microsystems, 73, 2020.
3. Song L., Duan S., Wang T. and Liu X., A simplified flying capacitor voltage control strategy for hybrid clamped three-level boost converter in photovoltaic system, IEEE Transactions on Industrial Electronics, doi: 10.1109/TIE.2021.3104607.
4. Zhao C., Wu X., Meng P. and Qian Z., Optimum design consideration and implementation of a novel synchronous rectified soft-switched phase-shift full-bridge converter for low-output-voltage high-output-current applications, IEEE Transactions on Power Electronics, 24 (2), 388-397, 2009.
5. Guo L., Hung J.Y. and Nelms R.M., Evaluation of DSP-based PID and fuzzy controllers for DC-DC converters, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 56 (6), 2237-2248, 2009.
6. Veerachary M. and Devassy S., Robust stabilizing digital controller for soft-switching zero voltage turn-on H-bridge boost converter, Joint International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems & Power India, New Delhi, 1-5, 2010.
7. Vijayalakshmi S., Arthika E. and Priya G. S., Modeling and simulation of interleaved buck-boost converter with PID controller, IEEE 9th

- International Conference on Intelligent Systems and Control (ISCO), Coimbatore, 1-6, 2015.
8. Ray P.K., Das S.R. and Mohanty A., Fuzzy controller designed pv based custom power device for power quality enhancement, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 34 (1), 405-414, 2019.
  9. Rai N., Rai B., Control of fuzzy logic-based PV-battery hybrid system for stand-alone DC applications, *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, 5 (2), 135-143, 2018.
  10. Cheng L. et al., Model predictive control for DC–DC boost converters with reduced-prediction horizon and constant switching frequency, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 33 (10), 9064-9075, 2018.
  11. Cunha R.B.A., Inomoto R.S., Altuna J.A.T., Costa F.F., Di Santo S.G., Sguarezi Filho A.J., Constant switching frequency finite control set model predictive control applied to the boost converter of a photovoltaic system, *Solar Energy*, 189, 57-66 2019.
  12. Mousavi M.A., Hajihosseini P., Behnam B., Presenting an effective and easy method for designing and tuning predictive controller for boost and buck-boost converters in continuous conduction mode, *Control Engineering Practice*, 114, 2021, 104882.
  13. Irmak E., and Güler N., A model predictive control-based hybrid MPPT method for boost converters, *International Journal of Electronics*, 107 (1), 1-16, 2020.
  14. Hossain M.Z., Rahim N.A., Selvaraj J., Recent progress and development on power DC-DC converter topology, control, design and applications: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81 (1), 205-230, 2018.
  15. Qi Q., Ghaderi D., Guerrero J.M., Sliding mode controller-based switched-capacitor-based high DC gain and low voltage stress DC-DC boost converter for photovoltaic applications, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 125, 2021, 106496.
  16. Sree B. L. and Umamaheswari M. G., Modeling and control of solar power fed single ended primary inductor converter using cascade control scheme, *Trends in Industrial Measurement and Automation (TIMA)*, Chennai, 1-7, 2017.
  17. Raj R.N., Purushothaman K.V. and Singh N.A., Adaptive TSK-type neural fuzzy controller for boost DC-DC converter, *IEEE International Conference on Circuits and Systems (ICCS)*, Thiruvananthapuram, 441-446, 2017.
  18. Açıkgöz H., Şekkelı M., Experimental setup of a DSP based electronic power transformer using type-2 neurofuzzy controller, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35 (4), 2147-2160, 2020.
  19. Nouri A., Salhi I., Elwarraki E., Beid S., Essounbouli N., DSP-based implementation of a self-tuning fuzzy controller for three-level boost converter, *Electric Power Systems Research*, 146, 286-297, 2017.
  20. Almasi O. N., Fereshtehpoor V., Khooban M. H., Blaabjerg F., Analysis, control and design of a non-inverting buck-boost converter: A bump-less two-level T–S fuzzy PI control, *ISA Transactions*, 67, 515-527, 2017.
  21. Cheng C.H., Cheng P.J., Wu M.T., Fuzzy logic design of self-tuning switching power supply, *Expert Systems with Applications*, 37 (4), 2929-2936, 2010.
  22. Srinivasan S., Tiwari R., Krishnamoorthy M., Lalitha P.M., Raj K.K., Neural network based MPPT control with reconfigured quadratic boost converter for fuel cell application, *International Journal of Hydrogen Energy*, 46 (9), 6709-6719, 2021.
  23. Ozdemir S., Altın N, Sefa I., Fuzzy logic based MPPT controller for high conversion ratio quadratic boost converter, *International Journal of Hydrogen Energy*, 42 (28), 17748-17759, 2017.
  24. Dong M., Li H., Zhong Q., and Wu Y., Common mode noise analysis of buck-boost converter for hybrid energy storage systems, *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and IEEE Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC/APEMC)*, 1013-1017, 2018.
  25. Aktaş A., Erhan K., Özdemir Ş., Özdemir E., Dynamic energy management for photovoltaic power system including hybrid energy storage in smart grid applications, *Energy*, 162, 72-82, 2018.
  26. Liao Z., Lei Y. and Pilawa-Podgurski R.C.N., Analysis and design of a high-power density flying-capacitor multilevel boost converter for high step-up conversion, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 34 (5), 4087-4099, 2019.
  27. Ushakumari S. and Mithila A. K., Design of robust sliding mode and fuzzy logic controllers for boost and buck-boost converters, *International Conference on Intelligent Computing, Instrumentation and Control Technologies (ICICT)*, Kannur, 463-468, 2017.
  28. Yarıkkaya S., Çınar S.M., Designing and performance testing of programmable power supply and DC/DC converter-based PV emulators, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36 (3), 1361-1372, 2021.
  29. Rex S. R. and Praba D.M.M.S.R., Design of PWM with four-transistor comparator for DC–DC boost converters, *Microprocessors and Microsystems*, 72, 2020.
  30. Thrimawithana D. J., Madawala U. K. and Lunenburg P., A novel buck-boost control technique for push-pull parallel-resonant converters, *32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics*, Paris, 2805-2811, 2006.
  31. Şenol M.A., Fuzzy logic-based power factor correction in single phase AC-DC system, *Bitlis Eren University, Journal of Science*, 10 (2), 602-612, 2021.
  32. Özdentürk A. and Akkaya R., Analysis of boost type converter with power factor correction used in electric vehicle chargers, *European Journal of Science and Technology, Special Issue*, 308-314, 2020.
  33. Li G., Huang H., Song S., Liu B., A nonlinear control scheme based on input–output linearized method achieving PFC and robust constant voltage output for boost converters, *Energy Reports*, 7, 5386-5393, 2021.
  34. Vatanserver F. and Kuyu Y.Ç., Buck, boost and buck-boost converter designs with various metaheuristic methods, *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 24 (1), 383-390, 2019.
  35. Keskin R, Aliskan I, Daş E. Robust structured controller synthesis for interleaved boost converters using an H<sub>∞</sub> control method. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 43 (14), 3169-3180, 2021.
  36. Gkizas G., Optimal robust control of a Cascaded DC–DC boost converter, *Control Engineering Practice*, 107, 2021, 104700.
  37. Rezvanvardom M., Mirzaei A., High gain configuration of modified ZVT SEPIC-Boost DC–DC converter with coupled inductors for photovoltaic applications, *Solar Energy*, 208, 357-367, 2020.
  38. Gupta A., Ayyanar R. and Chakraborty S., Soft-switching mechanism for a high-gain, interleaved hybrid boost converter, *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics*, 2 (4), 420-430, 2021.
  39. Demirtaş M., Sefa, İ., Irmak E., Çolak, İ., Microcontroller based DC-DC boost converter for solar energy systems, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* 23 (3), 719-728, 2008.
  40. Masri S. and Chan P. W., Design and development of a DC-DC boost converter with constant output voltage, *International Conference on Intelligent and Advanced Systems*, Manila, 1-4 2010.
  41. Hart, D.W., *Power electronics*, Published by McGraw-Hill, New York, 2011.
  42. Erickson R. W., Dragan Maksimovic, *Fundamentals of power electronics*, Kluwer Academic Publishers, New York, 2001.
  43. Ogata, K., *Modern control engineering*. Prentice Hall PTR Upper Saddle River, NJ, USA, 2001.
  44. Haugen, F., *Ziegler-Nichols' closed-loop method*, Skien, Norway, 2010.
  45. International Electrotechnical Commission. *International Standards and Conformity Assessment*. IEC 61204. Geneva, Switzerland: IEC, 2001.
  46. Marian K. Kazimierczuk, *Pulse-width modulated DC–DC power converters*, John Wiley & Sons, Dayton, Ohio, USA, 2008.

