



## AYRIŞTIRMALI YÜKSELTİCİ TİP GÜÇ DÖNÜŞTÜRÜCÜSÜ İÇİN GERÇEK ZAMANLI MİKRODENETLEYİCİLİ KONTROLCÜ TASARIMI

Ömer Faruk GÖKSU<sup>1</sup>, Revna ACAR VURAL<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Fatih Sultan Mehmet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Müh. Böl., İstanbul, Türkiye  
<sup>2</sup> Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektronik ve Haberleşme Müh. Böl., İstanbul, Türkiye

### Anahtar Kelimeler

*Oransal İntegral Kontrol,  
Bulanık Mantık,  
Güç Dönüştürücü,  
Ayrıştırılmalı Yükseltici,  
Gerçek Zamanlı Sistem.*

### Öz

Devre ve kullanılan elemanların boyutlarını küçültmek, çıkış gerilimi dalgalılık ve darbe genlik modülasyonu doluluk oranını azaltmak için literatürde paralel yapıdaki yükseltici tip güç dönüştürücüsü önerilmiştir. Bu yapının yüklü ve yüksüz durumda kararlı çıkış sağlayabilmesi için çeşitli kontrol metotları uygulanmış ve performansları deneysel ortamda karşılaştırılmıştır. Tasarlanan sistem, integral, oransal-integral, bulanık mantık kontrol metotlarının uygulandığı gerçek zamanlı mikro denetleyici temelli bir geri besleme yapısı içermektedir. Elde edilen sonuçlara göre bulanık mantık denetleyicili sistemin tepki süresi diğer yöntemlere göre daha düşük olduğundan dolayı güç verilen sistem için daha kararlı bir güç kaynağı olmaktadır.

## DESIGN OF A REAL-TIME MICROCONTROLLER FOR INTERLEAVED BOOST CONVERTER

### Keywords

*Proportional-Integral  
Control,  
Fuzzy Logic,  
Power Converter,  
Interleaved Boost,  
Real Time System.*

### Abstract

Interleaved boost converters proposed in the literature for reduce the size of the circuit and the amount of components, and to decrease the output voltage ripple and pulse width modulation duty cycle. In order to obtain a stable voltage at the output of interleaved boost converters, various control methods have been applied and the performances have been compared in the experimental environment. The proposed system consists of a real-time microcontroller-based feedback structure in which integral, proportional-integral, fuzzy logic control methods are applied. According to the results, the response time of the fuzzy logic controller system is lower than other control methods, so it becomes a more stable power source for the energized system.

### Alıntı / Cite

Göksu O. F., Acar Vural R., (2018). Ayrıştırılmalı Yükseltici Tip Güç Dönüştürücüsü için Gerçek Zamanlı Mikrodenetleyicili Kontrolcü Tasarımı, *Journal of Engineering Sciences and Design*, 6(2), 282-293.

### Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

Ö.F.Göksu, 0000-0002-5192-7055  
R.Acar Vural, 0000-0002-8587-5185

<b>Başvuru Tarihi / Submission Date</b>	18.01.2018
<b>Revizyon Tarihi / Revision Date</b>	08.05.2018
<b>Kabul Tarihi / Accepted Date</b>	15.05.2018
<b>Yayın Tarihi / Published Date</b>	23.06.2018

\* İlgili yazar / Corresponding author: [racar@yildiz.edu.tr](mailto:racar@yildiz.edu.tr), +90-212-358-5919

## 1. Giriş

Günümüz elektronik cihazlarında, anahtarlamalı DA-DA güç dönüştürücüleri, yüksek verimliliği ve yüksek güç yoğunluğunu düşük maliyet ve küçük boyutları ile sağlamaktadırlar. Ayrıca bu güç dönüştürücüleri, girişlerinde bulunan gerilim seviyesini alçaltabilir, yükseltebilir veya aynı yapıda hem alçaltma hem de yükseltme yapabilir. Tüketici elektroniğinde yaygın olarak kullanılan 5V, 7.2V, 12V gibi değerlere rağmen Li-Po, Li-Ion tipi pillerden sağlanan nominal gerilim değerleri hücre başına 3.7V olmaktadır. Seri olarak bağlansa dahi, istenilen sabit voltajlar sağlanamamaktadır. Bu amaçla, pillerden sağlanan gerilimi kullanılacak cihazın çalışma gerilimine uygun seviyeye dönüştürebilmek için hafif ve az yer kaplayan yükseltici tip DA-DA güç dönüştürücüleri kullanılmaktadır (Alkrunz ve Yazıcı, 2016).

Güneş, rüzgar gibi sürdürülebilir enerji kaynaklarından elektrik enerjisi elde edilmeye başlanması da DA-DA güç dönüştürücülerinin tercih edilmesine sebep olmaktadır. Ortam şartlarından dolayı, güneş panellerinden istenilen gerilim seviyelerinin elde edilememesi, bu yapılar ile birlikte yükseltici tip güç dönüştürücülerinin kullanımını arttırmıştır (Fard ve Aldeen, 2016; Katic vd., 2014). Batarya kullanılması zorunlu olan biyomedikal uygulamalar, akıllı kablosuz bina içi sistemler, kablosuz sensör algılayıcı modülleri ve kablosuz haberleşme modülleri gibi aygıtlarda, anahtarlamalı DA-DA güç dönüştürücüleri kullanılarak bataryanın tamamen kullanılabilmesi ve batarya verimliliğinin yüksek olması sağlanır (Boscaino vd., 2013).

Hasaneen ve Mohammed, çevirici yapısının kontrolü için PWM sinyali kontrolünü karşılaştırıcı bir yapı ile sağlamıştır fakat bu yapı analog devrelere uygundur. Pellano ve Lin, güç çıkışını arttırmak için ayrıştırılmalı tip dönüştürücü yapısını önermiştir. Fakat yükseltici yapısının çıkış değeri kullanılan mikrodenetleyici referans değeri ile sınırlandırılmıştır. Liu ve Lu, çalışmalarında çok katlı yapıları kullanmışlar fakat bu yapılar yüksek güçlü sistemler için tasarlanmıştır. Gavagsaz-Ghoachani çalışmasında LC filter kullanarak giriş dalgalılığını azaltmış fakat sistem çıkış kontrolü için birden fazla geribildirim verisi kullanmıştır. Padmanaban tasarlamış olduğu sistemin kontrolü için DSP kullanmıştır. DSP kullanımı, control sisteminin hızlı olmasını sağlamakta fakat devre tasarımının karmaşıklığını arttırmaktadır. Åström ve Hägglund, PID kontrol ile çalışmalar yapmıştır fakat PID kontrol için tasarlanan sistemin tam modelinin çıkartılmış olması gerekmektedir. Joel vd, yaptıkları çalışma ile bulanık mantık kontrolcüsünün diğer kontrolcülere göre daha iyi bir performans sergilediğini göstermiş fakat yaptığı çalışma prototiplenmemiştir. Ugale ve Dixit, prototipledikleri sistemin kontrolünü bulanık mantık ile sağlamıştır fakat aynı sistem farklı kontrolcü metodları ile denenmemiştir.

Yapılan bu çalışma ile ayrıştırılmalı DA-DA yükseltici tip güç dönüştürücüsünün kontrolü ARM Cortex-M0

çekirdeğe sahip mikrodenetleyici ile sağlanmıştır. Mikrodenetleyici kullanımı, sistem kontrolcüsünün ve kontrolcü parametrelerinin kolaylıkla ayarlanabilmesini sağlamıştır. Dönüştürücü kontrolü için analog bir yapı gerekmekte ve mikrodenetleyici üstünde çalıştırılan algoritma kodları kolayca herhangi bir gömülü sisteme eklenebilmektedir. Bu sayede, PCB üstünde yerden kazanç sağlanmak istenen tasarımlarda alan kaybının önüne geçilebilmektedir. Tasarlanan kontrolcü üstünde farklı kontrol algoritmaları analog yapıların kontrolü için de kullanılabilir. Sistemin kontrol edebileceği çıkış gerilim değeri, mikrodenetleyici referans voltajından bağımsızdır. Farklı ihtiyaçlara yönelik yükseltici tip dönüştürücüler için kolayca ayarlanabilmektedir. Sistem kontrolünü gerçekleştirebilmesi için, sistem çıkış gerilimi geribildirim verisi olarak yeterli olmaktadır. Yapıda bulanık mantık denetleyici kullanılması ile sistemin tamamen modellenmesine ihtiyacı ortadan kaldırmıştır. Simülasyon ortamında tasarlanan sistem, donanımsal olarak prototiplenmiştir.

Bu çalışmada yükseltici tip DA-DA güç dönüştürücüsünün kontrol sisteminde farklı yöntemler uygulanarak performans incelemesi yapılmıştır. Farklı kontrol yöntemlerinin verimliliğinin incelenmesi için, gerçek zamanlı mikro denetleyici tabanlı bir kontrol sistemi tasarlanmıştır. 2. bölümde ayrıştırılmalı DA-DA yükseltici tip güç dönüştürücü modeli yer almaktadır. 3. bölümde karşılaştırılan kontrol metodları anlatılmıştır. Kontrol yöntemlerine ait simülasyon sonuçları ve üretilen dönüştürücü prototipinin deneysel sonuçları 4. bölümde verilmiştir. Son olarak, 5. kısımda sonuçlar tartışılarak yorumlanmıştır.

## 2. Bilimsel Yazın Taraması

Yükseltici tip DA-DA güç dönüştürücüleri, çıkışında giriş gerilimden daha yüksek gerilim seviyeleri sağlayan devre yapısıdır. Temel yapı; indüktör, diyot, anahtarlama elemanı ve çıkış kapasitöründen oluşmaktadır. Anahtarlama elemanı darbe genlik modülasyonu ( DGM ) ile kontrol edilmektedir. Temel yükseltici tip DA-DA güç dönüştürücü yapısından yüksek çıkış gücü alındığı durumlarda, DGM doluluk ve çıkış gerilimi dalgalılık oranının arttığı ve kullanılan devre eleman boyutlarının büyüdüğü gözlemlenmektedir. Devre ve kullanılan elemanların boyutlarını küçültmek, çıkış gerilimi dalgalılık ve DGM doluluk oranını azaltmak için, DA-DA güç dönüştürücülerinin paralel olarak kullanılması önerilmiştir (Hasaneen ve Mohammed, 2008; Pellano ve Lin, 2014; Liu vd., 2015; Lu vd., 2014).

DGM doluluk oranı kullanılarak, çıkış yüküne bağlı çıkış gerilimi ayarlanmaktadır. Çıkış geriliminin sabit tutulması için, DGM doluluk oranının bir kontrolcü kullanılarak çıkıştaki hataya göre ayarlanması gerekmektedir. Çıkış geriliminin kontrolü için, DGM doluluk oranının bir takım kontrol metodları

kullanılarak ayarlanması zorunluluk teşkil etmektedir (Segura vd., 2011; Ren vd., 2015).

Kontrol mekanizması, analog yapı veya mikro denetleyici denetimi ile sağlanabilmektedir. Analog yapının zaman içerisinde sürekli olarak örnekleme yapabiliyor olmasına rağmen, kullanımı halinde kontrol mekanizmasındaki değişiklikler analog devre tasarımının kısmen veya tamamen değişmesine sebep olmaktadır (Yazici vd., 2000). Mikro denetleyici temelli kontrol sistemlerinde, kontrol algoritması üzerindeki güncellemeler ve optimizasyon işlemleri yalnızca yazılım odaklı gerçekleştirildiğinden, tasarımcıya gerek zaman gerekse kontrol mekanizmasında esneklik sağlamaktadır. Bu esnekliğinden dolayı günümüzde mikro denetleyici temelli kontrol sistemleri sıklıkla kullanılmaktadır. Literatürdeki çalışmalara bakıldığında, gerçek zamanlı mikro denetleyici temelli kontrol yapılarında düşük örnekleme frekansları görülmektedir. Günümüzde teknolojinin gelişmesi ile birlikte, bu örnekleme frekansı artırılabilir ve böylece daha kararlı çalışan sistemler elde edilebilmektedir (Pellano ve Lin, 2014).

Kontrol mekanizmalarının düzgün bir şekilde çalışabilmesi için, kontrol edilecek sistemden birçok bilginin alınması gerekebilmektedir. Böylece sistem detaylı bir şekilde incelenebilir ve sistem çıkışı istenilen duruma daha rahat getirilebilir. (Gavagsaz-Ghoachani vd, 2017)

Birçok giriş verisinin olması, tasarlanan sistemin işlemesi için büyük bir veri kümesi olması anlamına gelmektedir. Bu verilerin düzgün bir şekilde işlenebilmesi ve sistemin gecikme yaşamaması için, daha fazla işlem gücüne sahip kontrol yapılarının tasarlanması gerekmektedir. Bu sebeple, DSP tabanlı kontrol sistemleri de literatürde bulunmaktadır. (Padmanaban vd, 2016)

Oransal (Proportional) - İntegral (Integral) - Türevsel (Derivative) kontrolcü, günümüzde sıklıkla kullanılmakta olan kontrol metotlarından biridir. Oransal-İntegral-Türevsel (OİT) kontrol metodu, temel matematiksel işlemlere dayanarak kontrol sinyalini sistem çıkışının geçmişteki (O), şimdiki (İ) ve gelecekteki (T) hataları çerçevesinde belirlemektedir. Farklı kontrol yapıları ile birlikte de kullanılan OİT kontrol, günümüzde birçok kontrol sorununa çözüm olarak önerilmektedir (Segura vd., 2011; Ren vd., 2015; Boscaino vd., 2013). Kontrol metodunun basitçe uygulanabilmesine karşın; katsayıların belirlenmesinde, sistem modelinin tam olarak çözümlenmesi ve model üzerinde göz ardı edilen model parametrelerinden dolayı da sistemin çalışması sırasında katsayıların yeniden ayarlanmasına olan gereklilikler modelin zayıf yönü olarak belirtilebilir (Åström ve Hägglund, 2001; Dinca ve Corcau, 2016).

Matematiksel olarak kesin şekilde belirlenemeyen ve

tahmin edilemeyen problemlere çözüm bulmak için bulanık mantık kontrolü önerilmiştir (Zadeh, 1965). Bulanık mantık yöntemi ile insanların tepki verme ve tahmin etme yetilerinin taklit edilmesi amaçlanmıştır. OİT kontrolünün aksine bulanık mantık kontrolünde, sistemin matematiksel modelinin tam olarak belirlenmesine gerek yoktur. Kesin sonuçlar yerine, sonuca olabildiğince yaklaşmak bulanık mantık kontrolün temelini oluşturur. Giriş ile çıkış sinyalleri arasındaki bağıntı, "eğer-o zaman" tipi kural tablosu ile belirlenir. Bu sayede bulanık mantık kontrolü, lineer olmayan sistemlerde ve ya matematiksel modeli çıkartılamayan sistemlerde kullanılabilir. Yapay sinir ağları gibi değişik algoritmalar ile birlikte kullanıldığında bu yöntem, OİT kontrolünün yetersiz kaldığı birçok kontrol sorununa çözüm olmaktadır. Son yarım yüzyılda, bulanık mantık kontrolü 1000'in üstünde ticari uygulamada ve akıllı gömülü sistemlerde kullanılmıştır (Wong ve Vincent, 2011). Klasik kontrol metotlarının verimliliğini ve performansını iyileştirmek üzere, bulanık mantık kontrolcü birçok araştırmacı tarafından geliştirilmektedir (Nhivekar vd., 2011; Azadean ve diğ., 2011; Karthikumar vd., 2012).

Bulanık mantık kullanılarak kontrol edilen sistemlerin, diğer sistemlere göre daha az karmaşık yapıda olduğu ve ortalama başarı oranında daha iyi sonuç verdiği gözlenmiştir (Joel vd, 2016; Ugale ve Dixit, 2017) .

### 3. Materyal ve Yöntem

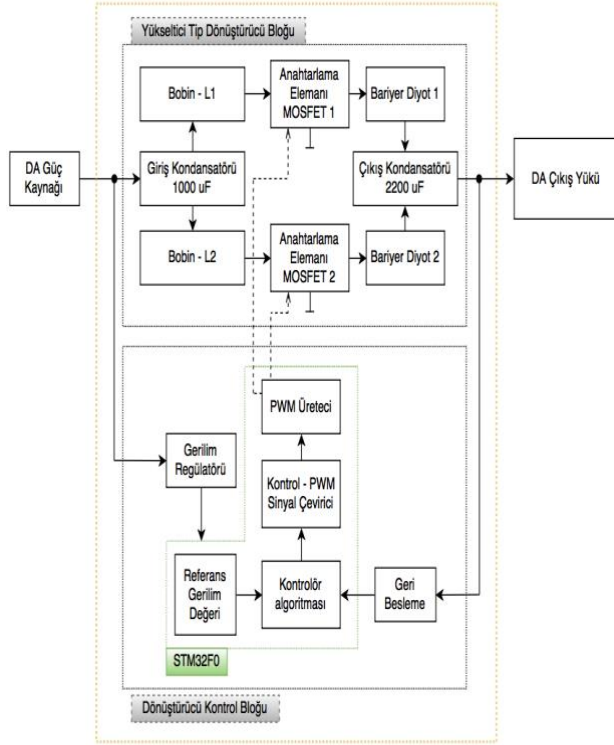
Güç dönüştürücülerinde çıkış akım ve/veya geriliminin artırılması, çıkış gerilim ve akımındaki kırılmaların azaltılması istenildiği durumlarda yükseltici tip dönüştürücüler (YTD) paralel bağlanabilmektedir. Bu yapılar literatürde ayrıştırılmalı DA-DA yükseltici tip güç dönüştürücüsü olarak geçmektedir. Ayrıştırılmalı DA-DA yükseltici tip dönüştürücü yapısı kullanıldığı durumlarda, çıkış / giriş gerilim oranı iki katına çıkmaktadır. Düşük giriş akımı kırılmaları azaldığında, pasif komponentlerin üzerine düşen akım stresi azalacağı için boyutları küçültülebilmektedir. Akım/gerilim katsayısı arttırılmak istendiğinde, paralel bağlı yapıların sayısı arttırılabilmektedir (Parveen ve Rupesh, 2016).

Şekil 1'de blok diyagramı verilen ayrıştırılmalı DA-DA yükseltici tip dönüştürücü, gerçek zamanlı ve farklı kontrol yapıları ile uygulanması açısından, mikro denetleyici temelli bir sistem olarak tasarlanmıştır. Sistem, genel olarak iki farklı yapıdan oluşmaktadır. Birinci yapı, analog elemanlar ile oluşturulan ve iki adet YTD'nin paralel olarak bağlanması ile oluşturulan YTD bloğunu, ikinci yapı ise YTD bloğunun ve çıkış geriliminin kontrolünü sağlayan dönüştürücü kontrol bloğunu oluşmaktadır.

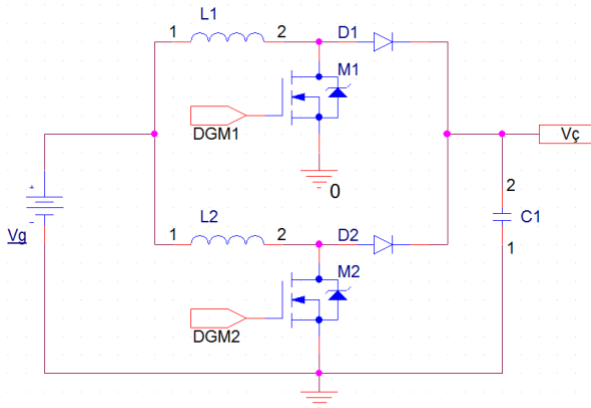
Şekil 2'de gösterilen devrede, anahtarlama elemanları (M1 ve M2) IRML2502 N-kanal Mosfet transistör, diyot elemanları (D1 ve D2) ES3D hızlı bariyer diyot, güç dönüştürücü devresinin kontrolünü sağlamak ve

kontrol metotlarını uygulamak için STM32F030 mikro denetleyicisi seçilmiştir. DGM1 ve DGM2 sinyalleri, mikro denetleyici ile 180° faz farkı olacak şekilde kontrol edilmektedir.

Tasarlanan sistemin sürekli hal durumu simülasyon çalışmaları ORCAD Capture programı ile yapılmıştır. Simülasyon çalışmaları, teorik hesaplar ile örtüştükten sonra devre gerçeklenmesine geçilmiştir. Teorik hesaplar sonucu bulunan devre elemanlarının değerleri L1=L2=47 µH, C1= 2200 µF şeklinde olup M1 ve M2 anahtarları olarak IRLML2502 kullanılmıştır. DGM doluluk oranları D1=D2=D seçilmiştir.



Şekil 1. Yükseltici Tip Dönüştürücü Blok Diyagramı



Şekil 2. Ayrıştırılabilir DA-DA Yükseltici Tip Güç Dönüştürücü (Parveen ve Rupesh, 2016)

### 3.1. Matematiksel Model

Geleneksel yükseltici tip dönüştürücünün tasarım denklemleri aşağıda verilmiştir.  $V_g$  sistemin giriş

gerilim değerini,  $V_c$  sistemin çıkış gerilim değerini,  $V_D$  diyot elemanı üzerine düşen gerilim değerini,  $V_{anahtar}$  anahtarlama elemanı üzerine düşen gerilim değerini,  $I_c$  çıkış akımının ortalama değerini belirtmektedir.  $T$  anahtarlama periyodunu,  $T_{açık}$  ve  $T_{kapalı}$  anahtarlama elemanının kesimde ve iletimde olduğu zaman periyodunu,  $f$  anahtarlama frekansını belirtmektedir.  $\Delta V_c$  sistem çıkışı üzerindeki dalgalılık gerilim değerini,  $\Delta I$  indüktör üzerindeki dalgalılık akım değerini,  $D$  ise DGM doluluk oranını belirtmektedir.  $L$  indüktör değerini,  $C$  değeri ise kapasitör değerini belirtir.

Eleman değerlerinin teorik hesaplamaları için, gerekli formüller aşağıda verilmiştir. İstenen çıkış gerilimi 5.4 V, giriş gerilimi 4 V, çıkış yükü  $R_{yük}=100 \Omega$ , çıkıştaki dalgalılık gerilim değeri ise %1'den küçük olması, anahtarlama frekansının 40 kHz olması istenmektedir. Denklem (3) yardımı ile doluluk oranı hesaplanmaktadır. Bu doluluk oranı ile birlikte istenen diğer parametreler denklem (6) ve denklem (7) 'de yerine konulduğunda, eleman değerleri  $C1=2200 \mu F$ ,  $L1=L2=47 \mu H$  olarak belirlenmiştir.

$$\frac{T_{kapalı}}{T_{açık}} = \frac{V_D + V_g - V_c}{V_g - V_{anahtar}} \quad (1)$$

$$T = T_{açık} + T_{kapalı} \quad (2)$$

$$D = \frac{T_{kapalı}}{T} \quad (3)$$

$$\frac{V_c}{V_g} = \frac{1}{1 - D} \quad (4)$$

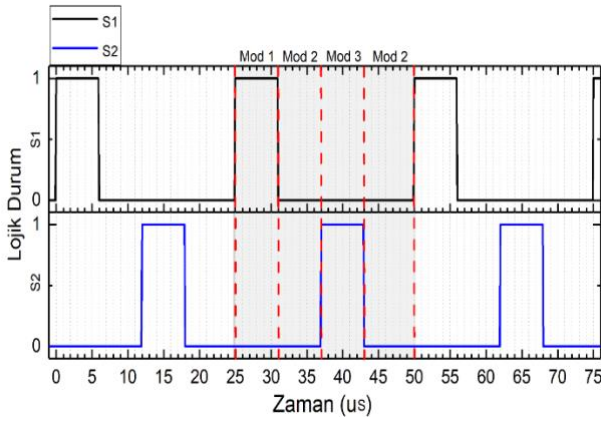
$$T = \frac{\Delta I \times L \times V_c}{V_g \times (V_c - V_g)} \quad (5)$$

$$\Delta I = \frac{V_g \times D}{f \times L} \quad (6)$$

$$\Delta V_c = \frac{I_c \times D}{C \times f} \quad (7)$$

### 3.2. Çalışma Modları

Şekil 3'te gösterildiği üzere, devre 3 farklı çalışma moduna sahiptir. Mod 1'de L1 indüktörü şarj durumunda, çıkış L2 indüktörü ile beslenir. Mod 2'de devre çıkışı önceden şarj olmuş indüktörler ile beslenir, indüktörler şarj edilmez. Mod 3'de ise L2 indüktörü şarj durumunda, çıkış L1 indüktörü ile beslenir.



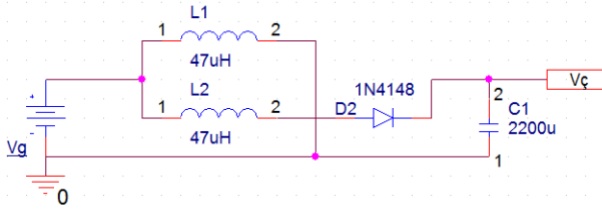
Şekil 3. Ayrıştırılabilir DA-DA Yükseltici Tip Güç Dönüştürücü için Çalışma Modları

### Mod 1: M1 anahtarı kapalı, M2 anahtarı açık

Devrenin mod 1 eşleniği Şekil 4'de verilmiştir. Mod 1'de diyot 1 kesimde, diyot 2 iletimdedir. L1 indüktörü giriş kaynağı ile şarj edilir ve L2 indüktöründeki enerji çıkış kapasitörüne aktarılır. Mod 1 için tasarım denklemleri (8,9) 'da verilmiştir.

$$\frac{diL_1}{dt} = \frac{V_g}{L} \quad (8)$$

$$\frac{diL_2}{dt} = \frac{V_g - V_c}{L} \quad (9)$$

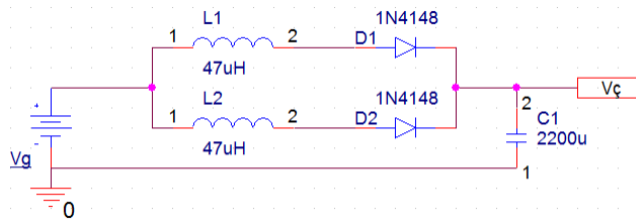


Şekil 4. Ayrıştırılabilir DA-DA Yükseltici Tip Güç Dönüştürücü Mod 1 Eşdeğer Devresi

### Mod 2: M1 ve M2 anahtarı açık

Devrenin mod 2 eşleniği Şekil 5'de verilmiştir. Mod 2'de diyotlar iletimdedir. İndüktörler çıkış kapasitörünü şarj etmektedir. Mod 2 için tasarım denklemleri (10) 'da verilmiştir.

$$\frac{diL_1}{dt} = \frac{diL_2}{dt} = \frac{V_g - V_c}{L} \quad (10)$$



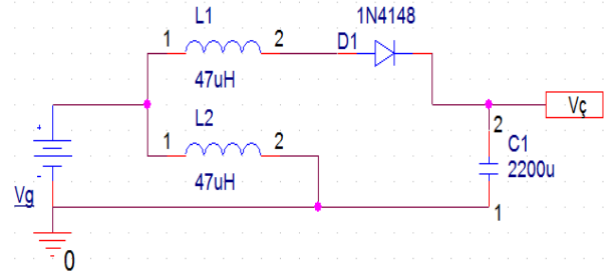
Şekil 5. Ayrıştırılabilir DA-DA Yükseltici Tip Güç Dönüştürücü Mod 2 Eşdeğer Devresi

### Mod 3: M1 anahtarı açık, M2 anahtarı kapalı

Devrenin mod 3 eşleniği Şekil 6'de verilmiştir. Mod 3'de diyot1 iletimde, diyot2 kesimdedir. L1 indüktörü çıkış kapasitörünü şarj ederken L2 indüktörü giriş kaynağı ile şarj edilir. Mod 3 için tasarım denklemleri (11,12) 'de verilmiştir.

$$\frac{diL_1}{dt} = \frac{V_g - V_c}{L} \quad (11)$$

$$\frac{diL_2}{dt} = \frac{V_g}{L} \quad (12)$$



Şekil 6. Ayrıştırılabilir DA-DA Yükseltici Tip Güç Dönüştürücü Mod 3 Eşdeğer Devresi

### 3.2. Önerilen Yöntem

Kontrol metodlarının tasarımları ve simülasyonları MATLAB yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Kontrolcü tasarımı için MATLAB programının Siso ve Fuzzy Logic araçları (tool) kullanılmıştır. Transfer fonksiyonu ve sistem örnekleme frekansı (mikrodenetleyicili sistem olmasından dolayı ) Siso aracına girilmiş ve araç içerisindeki otomatik katsayı belirleme fonksiyonu kullanılmıştır. Elde edilen katsayılar kullanılarak Simulink modülünde tasarlanan sistem simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Bulanık mantık denetleyici tasarımı için, ORCAD programında yapılan simülasyonlarda, çıkış yük değişimine göre çıkış gerilim seviyesinin korunması için gerekli DGM doluluk oran değişimleri çıkarılmıştır. Bu değişimlere göre üyelik fonksiyonları ve çıkış fonksiyonları belirlenmiş ve kural tablosu oluşturulmuştur. Simülasyonlar yardımı ile belirlenen kontrolcü yapılarının performansları, gerçekleştirilen sistem çıkışının "Tektronix TDS-2002C" osiloskop verileri ile karşılaştırılmıştır. Kullanılan devre elemanlarının idealsizliklerinden kaynaklı hatalar, kontrolcü parametrelerinin gerçek koşullara göre ayarlanması ile giderilmiştir.

Tasarlanan devre yapısının s-domeninde transfer fonksiyonu (13)'de verilmiştir.

$$G_{(s)} = \frac{V_{c(s)}}{1 - D} = \frac{V_{g(s)}}{sC(sL + R_L)} \quad (13)$$

Zamana bağlı hata sinyali  $e(t)$  (14)'de verilmiştir.  $V_h$

istenilen çıkış gerilimini belirtmektedir.

$$e(t) = V_h - V_c(t) \quad (14)$$

Hata sinyali  $e(t)$ , karşılaştırılan kontrol metodları için giriş sinyali olarak kullanılmıştır.

İntegral kontrolcü ve Oransal İntegral kontrolcü, mikrodenetleyicili sistem üstünde tek bir algoritma ile gerçekleştirilmektedir. İntegral kontrolcü için oransal katsayısı "0" olarak alınmış, böylece oransal kontrol devre dışı bırakılmıştır. Kullanılan algoritma akış diyagramı Şekil 7'de verilmiştir.

### İntegral Kontrol

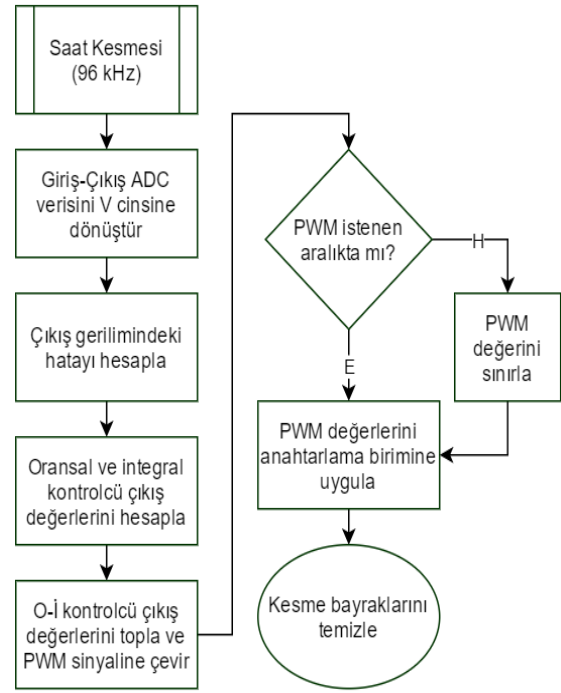
İntegral kontrol, sistemin geçmişteki hatalarına bağlı olarak değiştiren bir kontrol metodudur. Sistemin başlangıcından itibaren oluşan hataların toplamı, kontrol sinyalini oluşturur. Kontrolcü tasarımında, giriş sinyalleri normalize edilerek sistemin maksimum ve minimum giriş aralıklarına uygun şekilde dönüştürülür. Sayısal sistemlerde, her örnekleme periyodunda alınan hata değerleri toplanır ve sonuç denormalize edilerek çıkış sinyalini oluşturur. Örnekleme periyodunun sıklığı, sistemin çalışmasını doğrudan etkilemektedir. Giriş sinyalinin değişim frekansı, istediğimiz örnekleme periyodunu seçmek için bize referans olmaktadır. Sistemin kararlı bir yapıda çalışması için, giriş sinyali değişim frekansının en az 10 katı bir örnekleme periyoduna ihtiyacımız bulunmaktadır. Siso tool yardımı ile yapılan simülasyon çalışmaları neticesinde daha düşük bir örnekleme sıklığında, sistem değişimi takip edemeyecek ve gerekli güncellemeyi yapamayacaktır. Bu da kontrol sinyalinin yanlış hesaplanmasına ve sistemin kararsız çalışmasına sebep olacaktır.

MATLAB Siso aracı kullanılarak hesaplanan integral kontrolcü katsayısı  $K_i = 30$  olarak ayarlanmıştır. Farklı katsayılar ile simülasyon ortamında test edilen sistemde, daha düşük  $K_i$  katsayısı kullanılması halinde sistemin yeterince hızlı çalışmadığı gözlenmiştir. Ayarlanandan daha yüksek  $K_i$  katsayısı kullanıldığında, sistem çıkış geriliminde ani aşımalar ve düşümler gözlenmiş, sistem kararsız olmuştur. Şekil 8'de blok diyagramı verilen İntegral kontrolcünün z-domeninde transfer fonksiyonu (15)'de verilmiştir.

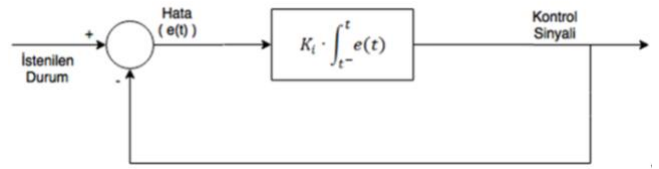
$$G_{I(z)} = K_i \frac{z}{z-1} \quad (15)$$

### Oransal İntegral (OI) Kontrol

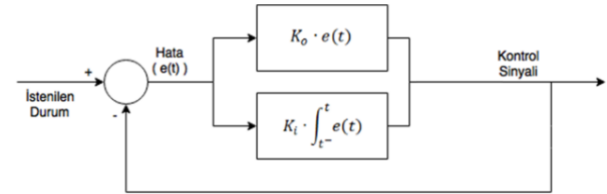
Oİ kontrol, sistemin anlık hatası ile birlikte geçmiş hatalarına bağlı olarak kontrol sinyalini değiştiren bir kontrol metodudur. Sistemin başlangıçtan beri olan hataların toplamına, sistemin o andaki hatası da eklenerek kontrol sinyalini oluşturulur. Sistemin kararlılığı, örnekleme periyoduna ve kontrolcü katsayılarına doğrudan bağlıdır. İntegral kontrolcü ile



Şekil 7. İ-Kontrolcü ve Oİ-Kontrolcü Akış Diyagramı



Şekil 8. İntegral Kontrolcü Blok Diyagramı



Şekil 9. Oİ Kontrolcü Blok Diyagramı

birlikte oransal kontrol ile birlikte kullanılması, sistemde oluşan ani değişimlere hızlı cevap verebilmesini sağlamaktadır. Böylece, sistemin kararlılığı ve güvenilirliği arttırılmaktadır.

Şekil 9'da blok diyagramı verilen Oİ kontrolcüsüne ait katsayılar, MATLAB Siso aracı yardımı ile  $K_o=1$  ve  $K_i=100$  olarak ayarlanmıştır. Oİ kontrolcünün z-domeninde transfer fonksiyonu (16)'da verilmiştir.

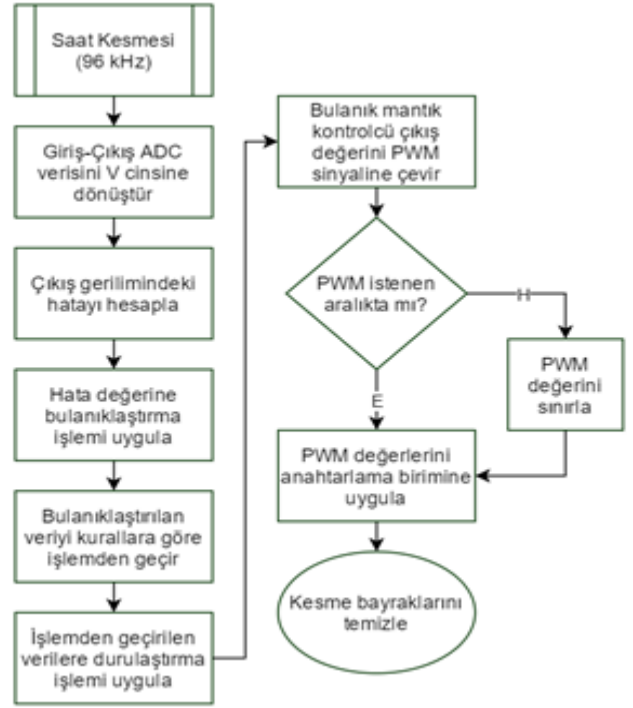
$$G_{OI(z)} = K_o + K_i \frac{z}{z-1} = (K_o + K_i) \frac{z - \frac{K_o}{K_o+K_i}}{z-1} \quad (16)$$

### Bulanık Mantık Denetleyici

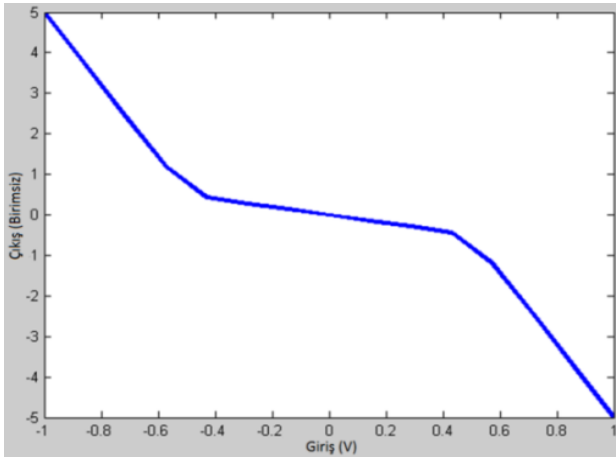
Bulanık mantık, lojik karar yapılarına alternatif ara değerler sunmaktadır. Lojik karar yapısında, doğru ve yanlış seçenekleri vardır. Bulanık mantık yapısında, doğru ve yanlış yerine, doğrudur, doğru olabilir, az



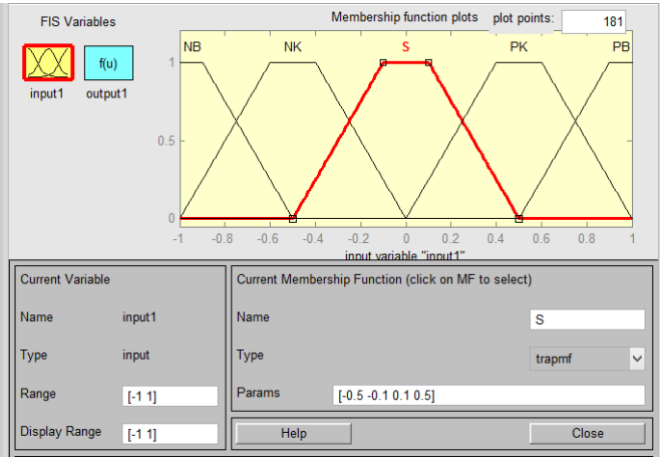
doğru, az yanlış, yanlış olabilir gibi seçenekler de bulunabilmektedir. Bulanık mantık denetleyici, daha esnek, hatalara karşı genel kontrolcülere göre (İ, Oİ) hataya karşı daha yüksek toleransa sahip bir kontrolcü yapısıdır. Önceden karşılaşılmayan bir durumda bile, bulanık mantık denetleyici doğru sonuca ulaşabilmektedir. İnsan benzeri bir düşünce yapısının makine diline uyarlanmış halidir. Bulanık mantık denetleyici, temel giriş ve çıkış kurallarına göre, sonuca ulaşan bir yapıdır. Blok diyagramı Şekil 10'da verilen bulanık mantık kontrolcüsü, temel olarak 4 yapıdan oluşmaktadır; bulanıklaştırma, kural tablosu, sonuç çıkarma, durulaştırma. Bulanıklaştırma işlemi ile giriş verileri üyelik fonksiyonlarına dönüştürülür. Üyelik fonksiyonlarına dönüştürülen giriş verileri, eğer-o zaman tipi kural tabloları ile yorumlanır. Kural tablosuna göre yorumlanan veriler, durulaştırma evresinde üyelik fonksiyonlarının ağırlık oranları ile çıkış fonksiyonuna dönüştürülür (Mao vd., 2013; Dela vd., 2015).



Şekil 10. Bulanık Mantık Algoritması Akış diyagramı



a.



b.

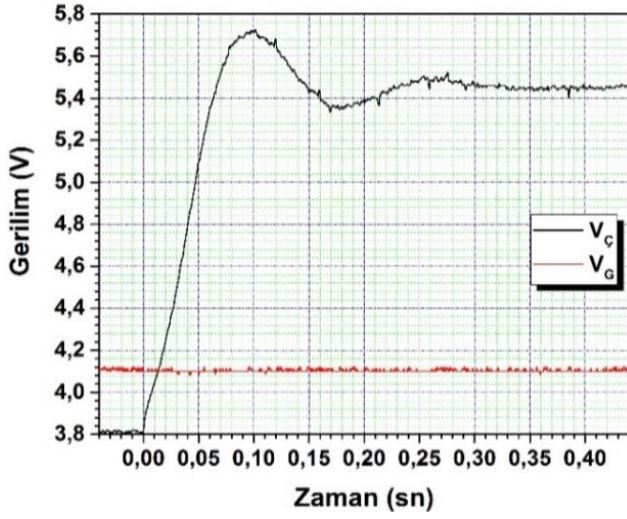
Şekil 11. Bulanık Mantık Denetleyici için a. Giriş-Çıkış İlişki Grafiği b. Giriş Üyelik Fonksiyonları



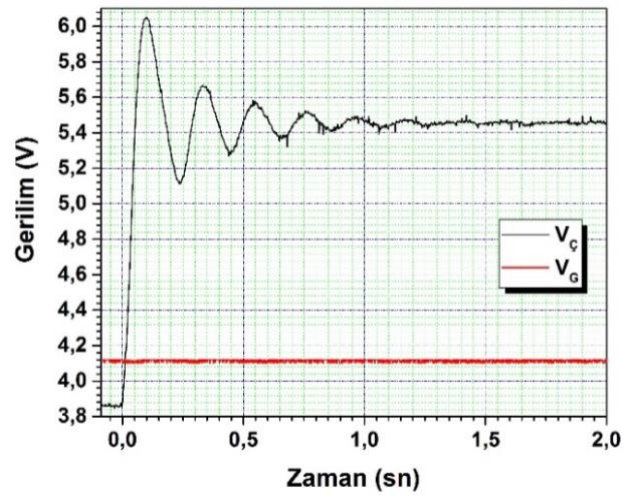
a.

b.

Şekil 12. Prototip Devre Gerçeklenmesi a. Üstten Görünümü b. Altan Görünümü



a.



b.

Şekil 13. İntegral Kontrolcü Sistem İlk Çalışma Grafiği a. Yüksüz durum b. Ryük = 100 Ω

Bulanık mantık denetleyicisi, MATLAB Fuzzy Logic aracı kullanılarak hazırlanmıştır. Tek giriş - tek çıkış olarak tasarlanan bulanık mantık kontrolcüsüne ait giriş-çıkış fonksiyon grafiği ve üyelik fonksiyonları Şekil 11 'de verilmiştir. Bulanık mantık denetleyicisi giriş sinyali olarak, anlık hata sinyali  $e(t)$ 'yi kullanmaktadır. Çıkış sinyali, DGM doluluk oranının değişim miktarını belirtmektedir.

#### 4. Araştırma Bulguları

Şekil 2'de verilen şematik tasarım, giriş gerilimi 4 V, çıkış gerilimi 5.4 V olacak şekilde tasarlanarak prototip devre oluşturulmuştur. Prototip tasarım için parametreler,  $C_1=2200 \mu\text{F}$ ,  $L_1=L_2=47 \mu\text{H}$ ,  $R_{yük}=100 \Omega$  (yük direnci) olarak seçilmiştir. Güç dönüştürücü anahtarlama frekansı 40 kHz, kontrolcü örnekleme frekansı ise 80 kHz olarak seçilmiştir. Tüm sistemin kontrolü, uygun boyutları ve istenilen çevre birimlerinin dahili olarak sunulmasından dolayı STM32F030 gerçek zamanlı mikro denetleyicisi ile sağlanmıştır. Gerçeklenen prototip devre Şekil 12'de verilmiştir.

Prototip testleri çeşitli senaryolar ile yapılmıştır. Bu senaryolar her kontrolcü için test edilerek, grafikler karşılaştırılmıştır. Sistemin sürekli hale geçiş durumu, çıkış gerilimi  $V_o \pm$  hata payı ( $5.4 \text{ V} \pm 300 \text{ mV}$ ) olarak belirlenmiştir.

İlk senaryo, sisteme güç verildiği zaman çıkış gerilimindeki değişimin gözlenmesidir. Yüklü ve yüksüz durum sistemin  $t=0$  anı sistem çıkışında RL yükünün bulunma ve bulunmama durumlarını belirtmektedir. Sistemin iki durumda da kararsızlık göstermemesi için, kontrolcü parametreleri optimum seviyede ayarlanmıştır. Yüklü ve yüksüz durumlarda çıkış geriliminin istenilen aralıklar dışına çıkmadan sağlanması, kontrolcülerin kararlılığını test etmek için önemli bir kriterdir. Kontrolcü parametreleri

simülasyon ortamında yüklü durum için belirlenmiş olmakla beraber, prototip çalışması sonrası osiloskop ile gözlenen sistem çıkışı yüklü ve yüksüz durum için test edilerek parametreler düzenlenmiştir. Şekil 13'de, integral kontrolcünün sisteme güç verildiği zaman çıkış gerilimine etkisi gözlenmiştir. İntegral kontrolcü katsayısı 30 olarak seçilmiştir. Şekil 13.a' da sistem çıkışında yük bulunmazken, Şekil 13.b'de 100 Ω çıkış yükü bulunmaktadır. Sistem integral kontrolcü ile denetlenirken, ilk güç verildiğinde çıkış yükü bulunmadığı durumlarda sistemin sürekli hale geçmesi 0.7 sn olarak belirlenmiştir. Geçici hal durumunda, çıkış gerilimi 5 V - 6 V arasında salınım yaparak yavaş yavaş istenilen seviyeye düşmekte, bu da istenmeyen bir durum olmaktadır. Çıkış yükü olduğu durumda, voltaj aşımı daha az seviyede olmaktadır. Sistem sürekli hale geçme süresi azalarak 0.25 sn olmaktadır.

İntegral kontrolcü yerine oransal-integral kontrolcü kullanıldığında çıkış gerilimi grafiği Şekil 14'de verilmiştir. Çıkış gerilimindeki voltaj aşımını çıkış yükü var olduğu ve olmadığı iki durum için de engellemiştir. Oİ-kontrolcü katsayıları  $K_o=1$ ,  $K_i=100$  olarak belirlenmiştir. Oİ-kontrolcü ile çıkış geriliminde aşım olmadığı gibi, sürekli hale geçiş süresi de ciddi oranda azalmıştır. Çıkış yükü olmadığı durum için, geçici hal süresi 50 ms iken, çıkış yükü olduğu durumda geçici hal süresi 120 ms olmaktadır.

Bulanık mantık denetleyici ile çalışan sistemin grafikleri Şekil 15'de verilmiştir. Sistem açılması çıkış yükü olan ve olmayan iki durum için de bulunmaktadır. Fakat geçici hal süreleri integral kontrolcüye göre kısadır. Çıkış yükü olduğu ve olmadığı durumlar için geçici hal süresi 100 ms' dir. Yüksüz durumda sürekli halde çıkış geriliminde kırılmalar bulunmaktadır.



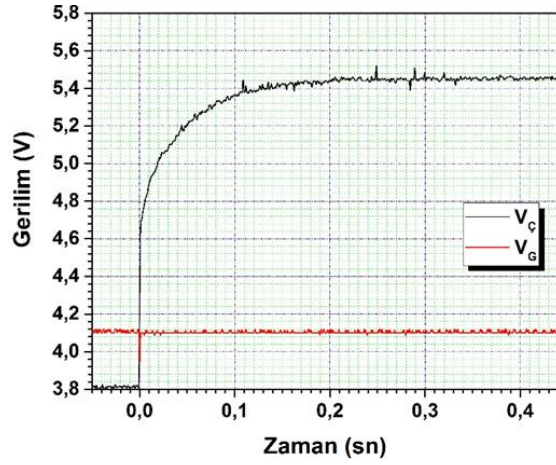
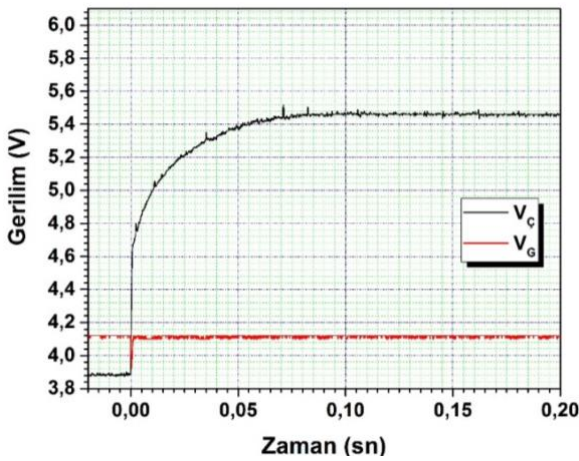
Şekil 16-18'de, donanımın farklı kontrolcüler ile çalışırken sistem çıkışında yük olmadığı durumdan, 100  $\Omega$  çıkış yüküne geçiş ve 100  $\Omega$  çıkış yükünden yüksüz duruma geçiş durumları incelenmiştir.

Şekil 16' da, integral kontrolcü tabanlı sistemin yük değişimine karşı çıkış gerilim değişim grafikleri verilmiştir. Şekil 16-a' da, çıkış yükü olmayan sisteme t=0 anında 100  $\Omega$  yük bağlanmıştır. Sürekli hale geçiş süresi bu durumda yaklaşık 250 ms sürmüştür. t=0 anında 100  $\Omega$  çıkış yükü sistemden kaldırıldığında oluşan geçici hal durumu Şekil 16-b' de verilmiştir. İstenilenden daha yüksek gerilim dalgalanması görülmüş, ayrıca geçici hal süresi 1 sn sürmüştür.

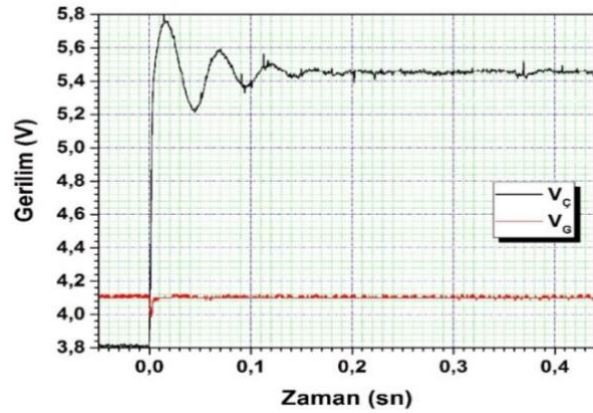
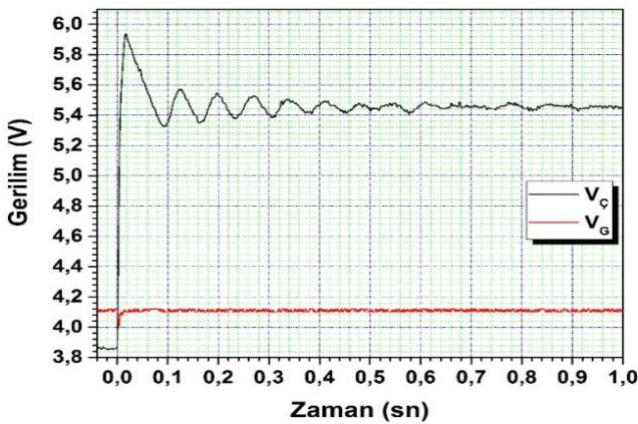
Şekil 17' de, Oİ-kontrolcü temelli sistemin yük değişimine göre çıkış gerilim değişimi grafikleri verilmiştir. Her iki durum için de geçici hal süresi 150 ms sürerken, voltaj aşımaları hata payı içinde kalmaktadır. Salınımın çok olmaması, sistemin integral kontrollü sisteme göre daha kararlı çalıştığını göstermektedir.

Bulanık mantık denetleyicili sistemin yük değişimine göre çıkış gerilimi değişimini gösteren grafikler Şekil 18'de verilmiştir. Çıkış gerilimindeki dalgalanmaya rağmen, çıkış gerilimindeki belirlenen hata payı göz önüne alındığında geçici hal süresi yüksüz halden 100  $\Omega$  yük direncine geçişte 50 ms, 100  $\Omega$  yük direncinden yüksüz hale geçişte 70 ms sürmektedir.

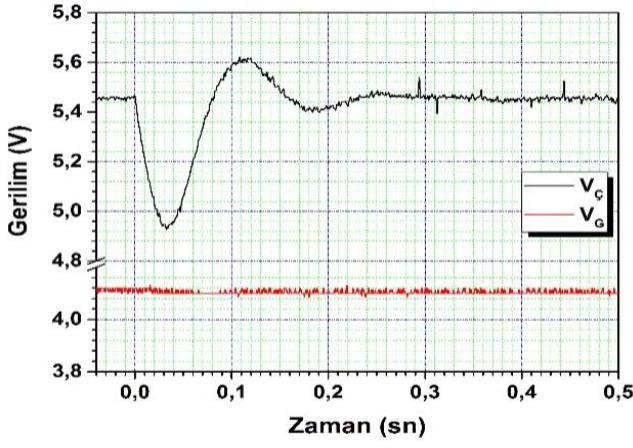
Şekil 19'da sunulan grafiklerde belirtilen sürekli yük değişimi, periyodik şekilde sistem çıkışında bulunan yük direncinin belirli değerler arasında değiştirilmesini belirtmektedir. Şekil 19-a incelendiğinde, sürekli yük değişimi durumunda diğer kontrol metodlarına göre integratör kontrolcülü sistem kararsız çalışmaktadır. Bu da güç verilen sistemde hatalara ve güç verilen sistemin çalışmamasına yol açabilmektedir. Oİ kontrolcü ve bulanık mantık denetleyici sistemler Şekil 19-b ve 19-c' de incelendiğinde, integral kontrolcüye göre daha kararlı çalışmaktadır. Bulanık mantık denetleyicili sistemin tepki süresi diğer yöntemlere göre daha düşük olduğundan dolayı güç verilen sistem için daha kararlı bir güç kaynağı olmaktadır.



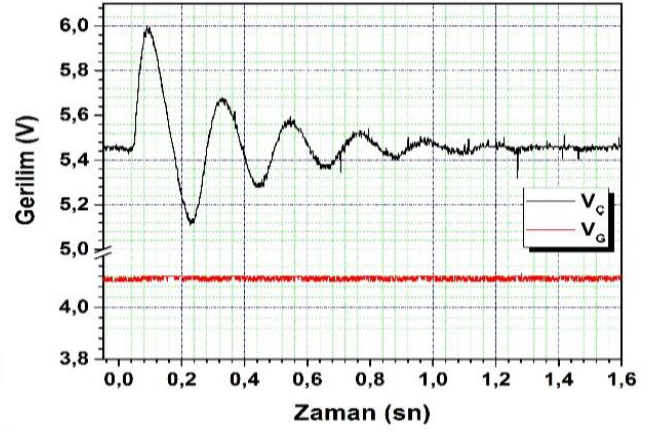
Şekil 14. Oransal İntegral Kontrolcü Sistem İlk Çalışma Grafiği a. Yüksüz durum b. Ryük = 100  $\Omega$



Şekil 15. Bulanık Mantık Denetleyicili Sistem İlk Çalışma Grafiği a. Yüksüz durum b. Ryük = 100  $\Omega$

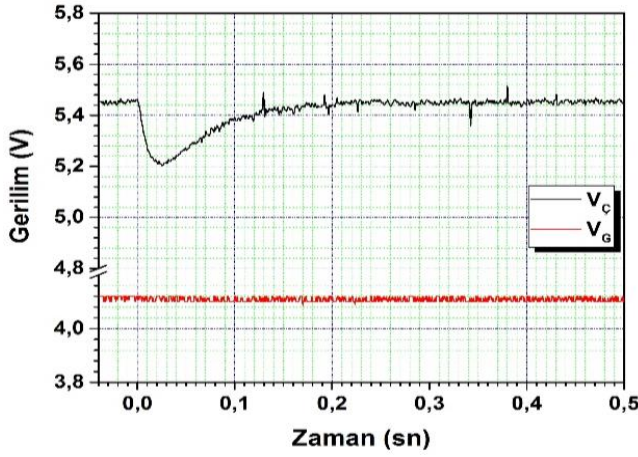


a.

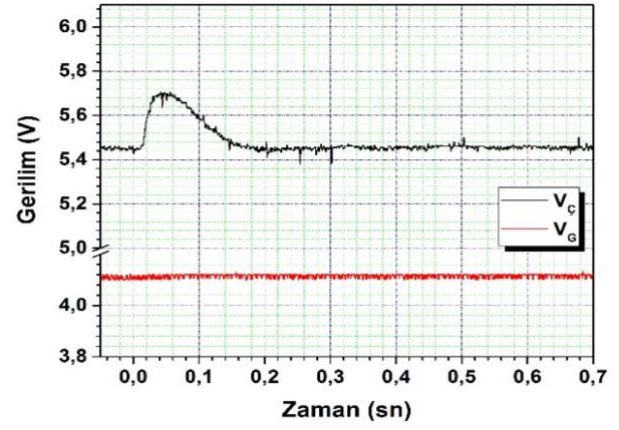


b.

Şekil 16. İntegratör Kontrolcü Çıkış Yüğü Değişim Grafikleri a. Yüksüz halden  $100 \Omega$  yük direncine geçiş b.  $100 \Omega$  yük direncinden yüksüz hale geçiş

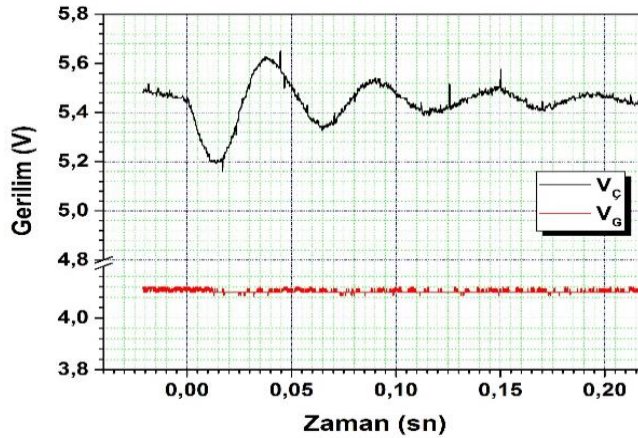


a.

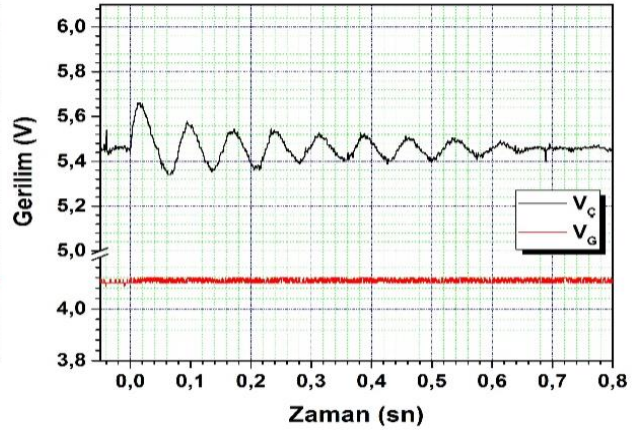


b.

Şekil 17. Oİ Kontrolcü Çıkış Yüğü Değişim Grafikleri a. Yüksüz halden  $100 \Omega$  yük direncine geçiş b.  $100 \Omega$  yük direncinden yüksüz hale geçiş



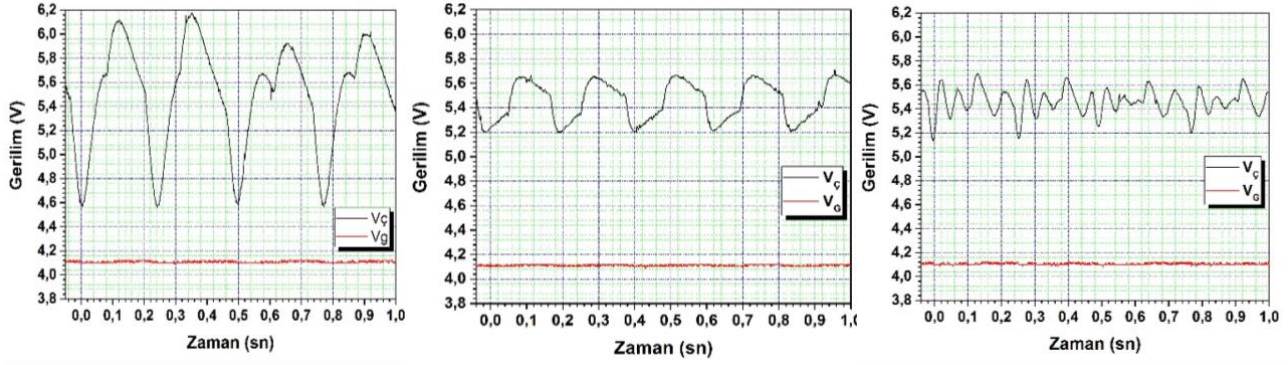
a.



b.

Şekil 18. Bulanık Mantık Denetleyici Çıkış Yüğü Değişim Grafikleri a. Yüksüz halden  $100 \Omega$  yük direncine geçiş b.  $100 \Omega$  yük direncinden yüksüz hale geçiş





**Şekil 19.** Sürekli Yük Değişimine göre Çıkış Değişim Grafikleri **a.** İntegral Kontrolcü **b.** Oİ Kontrolcü **c.** Bulanık Mantık Denetleyici

## 5. Sonuç ve Tartışma

Bu çalışmada, yükseltici tip ayrıştırılmalı güç dönüştürücüsünün yüklü ve yüksüz durumda kararlı çıkış sağlayabilmesi için çeşitli kontrol metotları uygulanmış ve performansları deneysel ortamda karşılaştırılmıştır. Tasarlanan sistem, integral, oransal-integral, bulanık mantık kontrol metotlarının uygulandığı gerçek zamanlı mikro denetleyici temelli bir geri besleme yapısı içermektedir. Mikro denetleyici olarak ST Microelectronics firmasının STM32F030 işlemcisi kullanılmış, güç dönüştürücü yapısı olarak Şekil 2'de şematığı verilen devre gerçekleştirilmiştir.

Sistem çıkışındaki gerilim dalgalanmalarının ve geçici hal süresinin göz ardı edilebileceği durumlarda (rezistif ısıtıcılar gibi) integral kontrolcü basit ve kolay kullanılabilen bir kontrolcü tipi olarak karşımıza çıkmaktadır.

Fakat, çıkış yükü motor gibi endüktif elemanlardan oluşuyor ise yük değişimlerinden çabuk etkilenen integral kontrolcünün kullanımı istenilen performansı verememektedir. Böyle durumlarda integral kontrolcü kullanımı, güç sağlanan sistemde gerilim değişimlerinden etkilenebilecek donanımlarda çeşitli sorunlara yol açabilmektedir. Geçici hal süresinin uzun olması da, güç sağlanan sistemin kararlı çalışmasını engellemekte hatta çalışmamasına yol açmaktadır. Bu tarz sorunlara çözüm olarak integral kontrolcüye oransal kontrolcü eklenmiş ve Oİ kontrolcülü sistem oluşturulmuştur. Oİ kontrol ile gerilim aşımı bazı durumlar için tamamen engellenmiş, bazı durumlarda da istenilen hata payı içerisinde tutulmuştur. Böylece güç verilen sisteme voltaj dalgalanmasından dolayı bir zarar verilmesi engellenmiştir. Yük değişiminde geçici hal süresinin kısa sürmesi, güç verilen sistemin kararlı çalışması için en önemli etkidir. Kontrolcü olarak bulanık mantık denetleyici kullanımı, grafikler incelendiğinde, geçici hal süresini Oİ kontrolcüye göre kısaltmıştır. Fakat çıkış gerilimindeki dalgalılık Oİ kontrolcünden fazladır. Bu dalgalılığı azaltmak ve

bulanık mantık denetleyicinin performansını arttırmak için, ilerideki çalışmalarda hata sinyali ile birlikte, hata sinyalinin değişim oranı da bulanık mantık denetleyici için giriş olarak kullanılabilir. Oİ kontrollü ve bulanık mantık denetleyicili sistemin çıkışında, çeşitli filtre devreleri kullanılırsa daha kararlı bir çıkış gerilimi seviyesi elde edilmesi mümkündür. Bu çıkarımların sonraki çalışmalarda incelenmesi planlanmıştır.

## Conflict of Interest / Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

No conflict of interest was declared by the authors.

## Kaynaklar

- Alkrunz, M., Yazıcı, I., 2016. Design of discrete time controllers for the DC-DC boost converter, SAÜ Fen Bil Der, 20(1), 75-82.
- Åström, K.J., Hägglund, T., 2001. The future of PID control, Control Engineering Practice, 9(11), 1163-1175.
- Azadean, A., Porobic, L., Ghazinoory, S., Samouei, P., Kheirkhah, A.S., 2011. Fuzzy logic in manufacturing: A review of literature and a specialized application". International Journal of Production Economics, 258-270.
- Boscaino, V., Ferraro, V., Miceli, R., Capponi, G., Proietto, R., 2013. A multi-input single-inductor power system for multisource energy harvesting, Renewable Energy Research and Applications (ICRERA) International Conference, 252-257.
- Dela, A.H.V., Navarro, N.A.J., Roque, C.J.E., Villano, A.P.R., Cruz, A.R., Guevarra, E.C., Roxas, E.A., Vicerra, R.R.P., 2015. Fuzzy logic based replenishment system for smart paper dispensing machine, Humanoid Nanotechnology Information

Technology Communication and Control Environment and Management, 1-7.

Dinca, L., Corcau, J.I., 2016. P.I. versus fuzzy control for a DC to DC boost converter, International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 803-808.

Fard, M., Aldeen, M., 2016. Robust control design of a DC micro grid comprising photovoltaic and battery systems, Power and Energy Engineering Conference IEEE PES Asia-Pacific, 329-336.

Gavagsaz-Ghoachani R., Zandi M., Jean-philippe M., Pierfederici S., PHATTANASAK M. ve Nahid-Mobarakeh B., (2017). Control of a Two-Phase Interleaved Boost Converter with Input LC Filter for Fuel Cell Vehicle Applications. 1-5.

Hasaneen, B.M., Mohammed, A.A.E., 2008. Design and simulation of DC/DC Boost Converter, Power System Conference, 2008. MEPCON 2008. 12th International Middle-East, 335-340.

Joel Y. S., Saikumar H. V. ve Patange S. S. R. , 2016. Design & performance analysis of Fuzzy based MPPT control using two-switch non inverting Buck-Boost converter, International Conference on Electrical Power and Energy Systems (ICEPES), 414-419.

Karthikumar, S., Mahendran, N., Sriraman, S., 2012. Design of Fuzzy logic controller for output voltage ripple (OVR) reduction of KY boost converter, Emerging Trends in Electrical Engineering and Energy Management (ICETEEEM) International Conference, 181-185.

Katic, J., Rodriguez, S., Rusu, A., 2014. Analysis of dead time losses in energy harvesting boost converters for implantable biosensors, NORCHIP, 1-4.

Liu, J., Gao, D., Wang, Y., 2015. High Power High Voltage Gain Interleaved DC-DC Boost Converter Application, Power Electronics Systems and Applications 6th International Conference, 1-6.

Lu, S., Mu, M., Jiao, Y., Lee, F.C., Zhao, Z., 2014. Coupled inductors in interleaved multiphase three-level DC-DC converter for high power energy storage applications, Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific) IEEE Conference and Expo, 1-6.

Mao, P., Jia, H., Wang, C.Y., Xu, M., 2013. Boost-Buck power factor correction converter with integrated different current control methods, ECCE Asia Downunder IEEE, 826-828.

Nhivekar, G.S., Nirmale. S., Mudholker, R.R., 2011. Implementation of fuzzy logic control algorithm in embedded microcomputers for dedicated application, International Journal of Engineering, Science and Technology, 3(4), 276-283.

Padmanaban S., Blaabjerg F., Martirano L., Siano P., Leonowicz Z. ve Maroti K.P., 2016. PI and fuzzy control strategies for high voltage output DC-DC

boost power converter — Hardware implementation and analysis, IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering, 1-6.

Parveen, N., Rupesh, K.C., 2016. Design and simulation of interleaved DC-DC boost converter for three-phase loads using solar panel, Computation of Power Energy Information and Communication International Conf, 514-519.

Pellano, K., Lin, J.C., 2014. Design and Implementation of a Microcontroller Based Interleaved DC-DC Boost Converter for Fuel Cell Electric Vehicles, Next-Generation Electronics International Symposium, 978(1), 4799-4780.

Ren, H.P., Guo, X., Zi, Y.C., Li, J., 2015. Double loop control of boost converter based current switching controller and voltage compensator, 7th International Conf on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI), 11-16.

Segura, F., Andujar, J.M., Duran, E., 2011. Analog Current Control Techniques for Power Control in PEM Fuel-Cell Hybrid Systems: A Critical Review and a Practical Application, Industrial Electronics IEEE Transactions, 58, 1171-1184.

Ugale C. P. ve Dixit V. V., 2017. Buck-boost converter using Fuzzy logic for low voltage solar energy harvesting application, 11th International Conference on Intelligent Systems and Control (ISCO), 413-417.

Wong, B.K., Vincent, S.L., 2011. A survey of the application of fuzzy set theory in production and operations management, International Journal of Production Economics, 129(1), 157-168.

Yazıcı, İ., Özdemir, A., Erdem, Z., 2000. Real time implementation of a digital controlled boost converter". International Conference on Electrical and Electronics Engineering - ELECO, 437-441.

Zadeh, L.A. (1965) Fuzzy sets, Information and Control, 8(3), 338-353.