

# DİJİTAL KONTROLLÜ LABORATUVAR GÜÇ KAYNAĞI TASARIMI

Özlem ÖZDEN<sup>1</sup>, Yankı DURU<sup>2</sup>, Sinan ZENGİN<sup>2</sup>, Mutlu BOZTEPE<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Vestel Elektronik Sanayi ve Ticaret A.Ş., 45030, Manisa

<sup>2</sup>Ege Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği, 35100 Bornova, İzmir  
ozlemozden.74@gmail.com, yanki1220@gmail.com,  
zengin.sinan@hotmail.com, mutlu.boztepe@gmail.com

## ÖZET

Uzun yıllar güç kaynağı pazarına egemen olan doğrusal güç kaynaklarının yerini günümüzde yüksek verim, düşük maliyet, hafiflik, küçük boyut ve esneklik gibi avantajları ile anahtarlamalı güç kaynakları doldurmuştur. Son yıllarda hemen her alanda olduğu gibi, anahtarlamalı güç kaynaklarının da yazılım bileşeni içerdiği ve bu sayede programlanabilme, uzaktan izlenip kontrol edilebilme gibi çeşitli akıllı fonksiyonlara sahip olduğu gözlenmektedir. Ancak bütün bu özelliklerin elde edilebilmesi için öncelikle dijital olarak kontrol edilebilen bir anahtarlamalı dc-dc dönüştürücü tasarımına ihtiyaç bulunmaktadır. Bu çalışmada çıkış gerilimi 0-30 V, çıkış akımı 0-5 A arasında ayarlanabilen dijital kontrollü bir Buck dönüştürücü tasarımı anlatılmaktadır. Tasarlanan dönüştürücü sadece sabit gerilim değil, aynı zamanda sabit akım kipinde de çalışabilmektedir. Gerçekleştirilen prototip üzerinde alınan ölçümler teorik hesap sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve tasarlanan 150W gücündeki güç kaynağının başarılı bir şekilde çalıştığı görülmüştür.

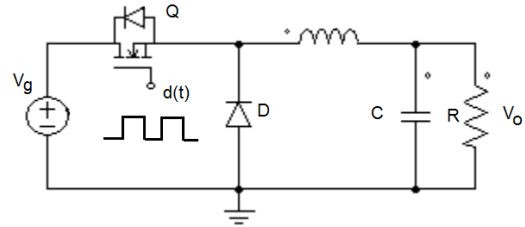
**Anahtar Kelimeler:** Dijital güç kaynağı, Buck dc-dc dönüştürücü, Dijital kontrol

## 1. GİRİŞ

Doğrusal voltaj regülatörlerinde seri bir geçiş transistörü bulunur. Ancak bu seri transistörün akımı yük akımına eşit, gerilimi ise giriş-çıkış gerilimlerinin farkı kadardır. Dolayısıyla üzerinde çok büyük miktarda ısı kaybı oluşur ve bu durum verimsiz bir çalışmayı

beraberinde getirir. Şekil-1'de görülen anahtarlamalı güç kaynağında da seri transistör olmasına karşın, transistörtam iletimde veya tam kesimde olacak şekilde anahtar gibi çalıştığı için ideal olarak sıfır kayıp ile görevini yerine getirebilmektedir. Pratikte anahtarlama ve iletim kayıpları olmasına karşın verim yine de doğrusal topolojilere göre daha yüksek olmaktadır. Öte yandan ağırlık, hacim, maliyet ve kontrol edilebilirlik gibi önemli avantajları nedeniyle anahtarlamalı güç kaynakları günümüzde pazara egemendir[1].

Diğer taraftan son yıllarda Endüstri 4.0 gibi yönelimlerle birlikte siber-fiziksel nesnelerin yazılım ile uzaktan izlenebilmesi ve kontrol edilebilmesi ihtiyacı ortaya çıkmaktadır [2]. Bu nesnelerin içerisinde güç kaynakları da bulunduğundan dijital kontrollü ve akıllı güç kaynaklarının tasarlanmasına gereksinim doğmaktadır.



Şekil 1. Buck DC/DC dönüştürücü.

Dijital kontrollü güç kaynakları kendi çalışma parametrelerini de gerçek zamanlı değiştirme yeteneğine sahiptirler. Örneğin Wei ve Horowitz

[3] yaptıkları bir çalışmada dijital kontrollü bir senkron buck dönüştürücü tasarlayıp ve anahtarlama frekansını yüke göre adaptif olarak değiştirerek verimi geniş bir çalışma sahasında %90'ın üzerinde tutmuşlardır. Park ve Hwang [4] dijital kontrol edilen bir buck-boost dönüştürücü ile bir LED sürücü devresi üzerinde çalışmışlardır. Abbasi [5] ise 8-bit STM işlemci ile bir buck dönüştürücünün dijital kontrol sistemi modelleme ve tasarımını göstermiştir. Literatürde dijital güç dönüştürücü performansını iyileştirmek, verimini artırmak, doğrusal olmayan kontrol ve interleaved vb. gibi yeni teknikleri uygulamak üzerine daha birçok çalışma mevcuttur [6-9].

Bu çalışmada bir buck dönüştürücünün akım ve gerilim kipinde çalıştırılması konusu incelenecektir. Bu amaçla öncelikle devre tasarımı anlatılmış, daha sonra STM32F4 ARM işlemcisi ile gerçekleştirilen prototip tasarımdan alınan deneysel ölçümler sunulmuştur.

## 2. BUCK DÖNÜŞTÜRÜCÜ TASARIMI

Şekil 1'de verilen Buck dönüştürücüde giriş gerilimi  $V_g$ , çıkış gerilimi  $V_o$  ve yük direnci  $R$  ile gösterilmiştir.  $Q$  anahtarının görev oranı (duty cycle)  $d(t)$  değiştirilerek  $V_o$  gerilimi sıfırdan başlayarak giriş gerilimine kadar değiştirilebilmekte ve böylece güç kontrolü yapılabilmektedir.  $D$  diyodu akım serbest geçişini (freewheeling) sağlarken, çıkışta bulunan 2. derece LC filtre ise anahtarlama sonucu oluşan yüksek frekanslı gerilim/akım bileşenlerinin yüke ulaşmasını engellemektedir. Gereken endüktans ve kapasite değerleri çıkışta istenen gerilim dalgalılık (ripple) değerine göre hesaplanmaktadır. Transistör ve diyot

elemanlarının seçimi yapılırken devrenin maksimum gücünde bu elemanların akım ve tepe gerilimleri temel alınmaktadır.

Tasarımda giriş geriliminin 30V değerinde sabit bir dc gerilim olduğu kabul edilmiştir. Çıkış gerilimi ise 0-30V arasında ayarlı dc olması gerektiğinden, sürekli iletim kipinde (CCM, Continuous Conduction Mode) çalışma göz önüne alınır ise, görev oranının,

$$D = \frac{V_o}{V_g} \quad (1)$$

ilişkinine göre 0 ile 1 arasında değişmesi gerektiği görülür. Benzer şekilde yük direnci  $R$  de  $V_o/I_o$  eşitliği gereği 0 ile sonsuz arasında değişmektedir. Ancak yük direnci sonsuz olursa CCM kipinde çalışabilmek için [10],

$$L = \frac{(1-D)R}{2f} \quad (2)$$

eşitliği gereği sonsuz değerli bir bobin kullanılması sonucu çıkmaktadır. Bu mümkün olamayacağından endüktans değerinin belirlenmesinde bobin akım dalgalılığı baz alınarak bir seçim yapılabilir. Bunun için en kötü durum olan  $V_o=0$  durumunda ve tam yükte tepeden-tepeye bobin akım dalgalılığı yük akımının %20'si olarak seçilirse,  $f=100\text{kHz}$  ve  $D=1$  için

$$L = \frac{V_g - V_o}{\Delta I_L} DT_s = \frac{30-0}{1}(1)(10\mu) = 300\mu\text{H} \quad (3)$$

elde edilir. Burada  $T_s=1/f$  anahtarlama periyodudur.

Çıkış kondansatörünün değeri ise aşağıdaki eşitlik ile hesaplanabilir [10],

$$C = \frac{\Delta I_L T_s}{8\Delta V_o} \quad (4)$$

eşitlikte  $\Delta V_o$  tepeden tepeye çıkış gerilim dalgalılığıdır. %1 oranında dalgalılık için C kondansatörünün değeri 4  $\mu\text{F}$  olarak hesaplanır. Ancak gerçek kondansatörlerin Eşdeğer Seri Direnç (ESR) değerleri yüzünden dalgalılık arttığından 4  $\mu\text{F}$ 'tan daha büyük bir kondansatör değeri seçilmelidir.

### 3. KONTROL SİSTEMİ TASARIMI

Gerilim kontrollü bir buck dönüştürücü için kontrol girişi  $d(s)$ 'den çıkış gerilimi  $V_o$ 'a olan  $G_{vd}(s)$  transfer fonksiyonu periyodik ortalama alma yöntemiyle aşağıdaki gibi elde edilebilir [11],

$$G_{vd}(s) = \frac{V_g(s)}{d(s)} = \frac{V_g}{s^2 LC + s \frac{L}{R} + 1} \quad (5)$$

Bu denklem standart form olan Eşitlik (6) ile benzeştirilerek transfer fonksiyonunun  $\omega_{do}$  doğal frekansı,  $Q$  kalite faktörü ve  $G_{d0}$  dc kazancı kolayca elde edilebilir,

$$G(s) = \frac{G_{d0}}{\left(\frac{s}{\omega_o}\right)^2 + \frac{s}{Q\omega_o} + 1} \quad (6)$$

elde edilen parametreler şu şekildedir:

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (7)$$

$$Q = R \sqrt{\frac{C}{L}} \quad (8)$$

$$G_{d0} = V_g \quad (9)$$

Bu transfer fonksiyonu ile kontrol sistemi bode diyagramları çizilerek kontrolcü tasarımları yapılabilir.

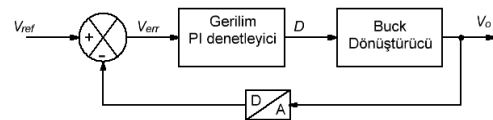
#### 3.1. Gerilim Denetleyicisi

Sabit gerilim kipinde, Şekil-2'den görüleceği üzere, dönüştürücü çıkış gerilimi  $V_o$  bir analog-dijital

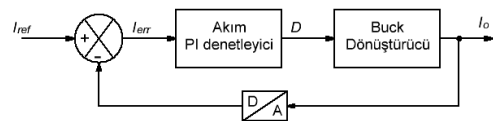
dönüştürücü yardımı ile ölçülür ve yazılım ile belirlenen referans gerilimden çıkarılarak  $V_{err}$  olarak isimlendirilen hata değeri elde edilir. PI denetleyicisi bu hata değerini sıfırlayacak şekilde kontrol sinyalini üreterek buck dönüştürücüye görev oranı  $D$  olarak uygular. Böylece buck dönüştürücü çıkış gerilimi her zaman  $V_{ref}$  gerilimini takip etmektedir. Eğer  $V_{ref}$  gerilimi sabit tutulursa hangi yük değeri bağlanırsa bağlansın buck dönüştürücü çıkış gerilimi sabit kalacaktır. Ancak yük direnci çok küçük değerlere inerse bu durumda gerilim sabit olduğundan çıkış akımı buck dönüştürücünün sınırlarının dışında çıkabilir. Bu nedenle kontrol sistemine bir akım denetleyici de eklemek gereklidir.

#### 3.2. Akım Denetleyicisi

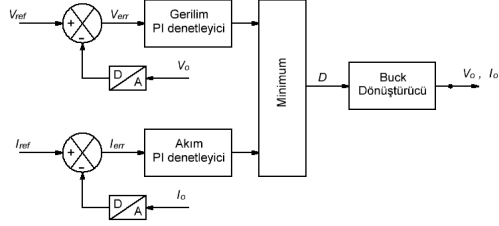
Şekil-3'te görüldüğü gibi, akım denetleyicisi gerilim denetleyicisine benzer şekilde çalışmaktadır. Çıkış akımı bir sensör ile algılandıktan sonra A/D dönüştürücü ile dijitale çevrilir ve akım referansı  $I_{ref}$ 'ten çıkarılarak akım hatası bulunur. Akım PI kontrolcüsü hatayı sıfırlayacak şekilde bir kontrol sinyali üretir ve bu değer görev oranı  $D$  olarak buck dönüştürücüye uygulanır. Böylece akım referansı  $I_{ref}$  aracılığıyla dönüştürücü çıkış akımının sınırlanması mümkündür.



Şekil 2. Sabit gerilim kontrol blok diyagramı



Şekil 3. Sabit akım kontrol blok diyagramı



Şekil 4. Akım- gerilim kontrol blok diyagramı

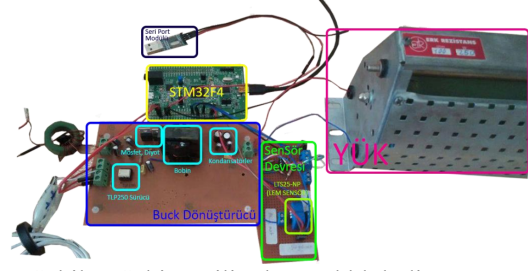
Gerçek bir güç kaynağında her iki kontrolcü birlikte çalışmak durumundadır. Bu nedenle gerilim ve akım kontrolcülere Şekil-4'te görüldüğü gibi paralel olarak birleştirilebilir. Her iki kontrolcü de birbirinden bağımsız olarak çalışabilmektedir. Ancak buck dönüştürücüye kontrol çıkış değerleri küçük olan seçilerek gönderilmektedir. Böylece görev oranı üzerinden buck dönüştürücünün  $V_{ref}$  ve  $I_{ref}$  ile belirtilen sınırların dışında çıkması engellenerek güvenli bir çalışma elde edilmektedir.

#### 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Gerçekleştirilen prototip buck dc-dc dönüştürücü STM32F4 Discovery kiti ile kontrol edilmiştir. Çıkış gerilimi bir rezistif gerilim bölücü ile çıkış akımı ise LA-25-NP akım sensörü ile ölçülmüştür.  $L$  endüktansı ETD29/16/10 nüvesine 1mm telden 60 tur sarılarak elde edilmiştir. Diğer özellikler Tablo-1'de verilmektedir.

Tablo 1. Prototip teknik özellikleri

Parametre	Değer
Giriş gerilimi, $V_g$	30V
Çıkış gerilimi, $V_o$	0-18V
Maks. çıkış akımı, $I_{o,max}$	5A
Endüktans, $L$	300 uH
Kondansatör, $C$	100uF
Mosfet, $Q$	IRFZ44N
Diode, $D$	MUR20200CT
Anahtarlama frekansı, $f$	100 kHz

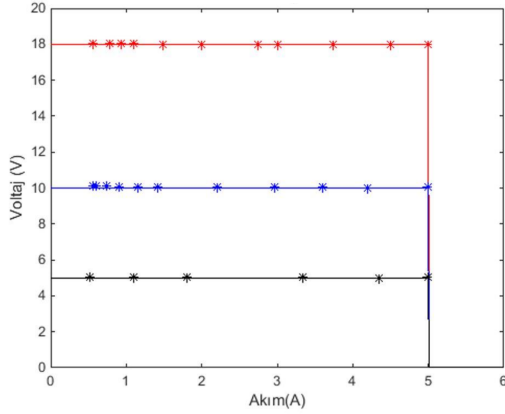


Şekil 5. Sabit gerilim kontrol blok diyagramı

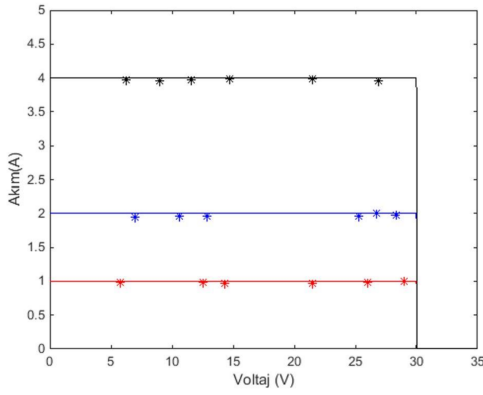
Mosfet sürücü olarak TLP250 entegresi kullanılmış ve beslemesi izole bir 15V gerilim kaynağından alınmıştır. Yük olarak 100W gücünde ayarlı direnç kullanılmıştır. Prototip devrenin görünüşü Şekil-5'te verilmektedir.

Sabit gerilim kipinde alınan deneysel ölçümler Şekil-6'ta grafik olarak sunulmaktadır. Görüldüğü üzere gerilim referansı 5V, 10V ve 18V değerlerine getirilerek 5A'ye kadar farklı çıkış akımlarında çıkış gerilimi ölçülmüş ve referans gerilim değeriyle birlikte çizilmiştir. Sonuçlar beklenen değerlerle çok uyumlu şekildedir. Bu test yapılırken akım referansı, en büyük değerinde olan 5A'de tutulduğundan çıkış akımı 5A'yi geçmemektedir.

Akım kontrolünü test etmek için yapılan deneylerin sonuçları ise Şekil-7'de verilmektedir. Akım referansı 1A, 2A ve 4A değerlerine getirilerek, farklı çıkış gerilimlerinde devrenin çıkış akımı ölçülmüştür. Şekilden görüldüğü üzere tasarlanan devre, çıkış akımını sabit değerinde tutma görevini başarıyla gerçekleştirmektedir. Bu test sırasında gerilim referansı, en büyük değeri olan 30 V'ta tutulduğundan çıkış gerilimi 30 V'u aşmamaktadır.

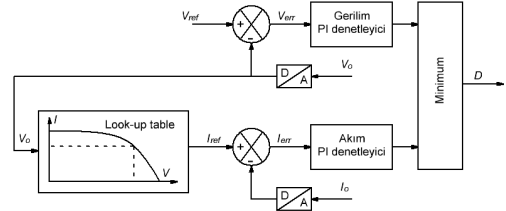


Şekil 6. Sabit gerilim kipinde çıkış akım gerilim grafiği.

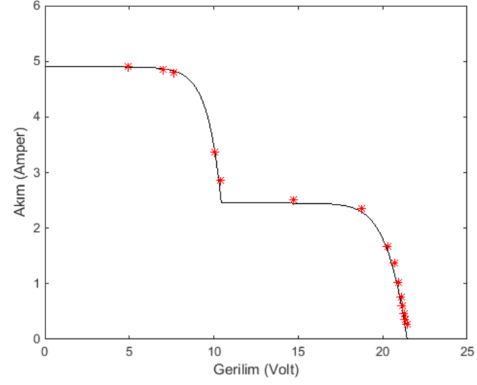


Şekil 7. Sabit akım modunda çıkış akım-gerilim grafiği.

Şekil-6 ve Şekil-7'den de görüleceği üzere sabit akım ve sabit gerilim kipinde dijital kontrollü güç kaynağı çok az bir hatayla istenilen akım ve gerilim değerlerinde çalışabilmektedir. Öyleyse istenen gerilim ve akım değerleri bir arama tablosu olarak yazılıma eklenir ve Şekil-8'de gösterildiği gibi ölçülen gerilim değerine göre arama tablosundan akım referansı okunursa istenilen akım-gerilim karakteristiğine sahip bir güç kaynağı elde edilebilir. Şekil 9'da kısmi gölgeli olan bir güneş pili akım-gerilim eğrisi ile ölçüm sonuçları birlikte verilmiştir. Görüldüğü üzere tasarlanan sistem verilen bir arama tablosundaki akım ve gerilim değerlerini çok iyi bir şekilde takip edebilmektedir.



Şekil 8. Akım referansını üretme blok diyagramı



Şekil 9. Arama tablosu kipinde çalışma

## 5. SONUÇ

Bu çalışmada buck tipi bir dc-dc dönüştürücünün kontrolü STM32F4 ARM işlemci ile gerçekleştirilmiştir. Çıkış gerilimi 0-30V ve çıkış akımı maksimum 5A olacak şekilde eleman değerleri seçilmiştir. Anahtarlama frekansı 100kHz olarak belirlenmiş ve böylece dijital kontrol bant genişliğinin 10kHz civarında yapılabilmesine olanak sağlanmıştır.

Yapılan deneysel çalışmalardan, dijital kontrol edilen bir güç kaynağının akım ve gerilim referanslarının yazılım ile kolaylıkla değiştirilebildiği ve prototip devrenin başarılı bir şekilde çalıştığı görülmüştür. ARM işlemcisini seri port, USB arabirim veya Wi-Fi ile dış erişimeçarak dijital güç kaynağının parametrelerini uzaktan değiştirmek ve böylece otomasyona bağlamak mümkündür. Öte yandan sadece yazılımda yapılacak ilavelerle tasarlanan sistemin bir fotovoltmik modül emulâtörüne dönüştürülmesi

veya “droop control” yöntemini sisteme entegre ederek 2 veya daha fazla cihazın güç paylaşımı şartlarında paralel bağlanması da olanaklıdır.

## 6. REFERANSLAR

- [1] A. I. Pressman, “Switching power supply design”, 2nd Ed. , McGraw-Hill, 1998.
- [2] Alçın, S . "ÜRETİM İÇİN YENİ BİR İZLEK: SANAYİ 4.0". Journal of Life Economics 3, sf. 19-30, 2016.
- [3] G. Wei, M. Horowitz, “A Fully Digital, Energy-Efficient, Adaptive Power-Supply Regulator ”, IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol. 34, No.4, pp.520-528, 1999.
- [4] J. Park, I. Hwang, “A Current-Mode Digital Controlled Buck-Boost DC-DC Converter for LED Driver”, IDEC Journal of Integrated Circuits and Systems, Vol.3, No.1, January 2017.
- [5] M.U. Abbasi, “Digital Control Of A Buck Converter Using An 8 Bit STM Microcontroller”, Int. Journal Of Scientific & Technology Research, Vol. 6, Iss. 4, April 2017.
- [6] X.Zhao, C.Chang, Y.Li, Z.Zhou, "Analysis of nonlinear phenomena in digital integral-controlled Buck converters." IEEE Region 10 Conference (TENCON), pp. 65-69, 2016.
- [7] M.Kanzian, M.Agostinelli, M.Huemer, "Modeling and Simulation of Digital Control Schemes for Two-Phase Interleaved Buck Converters", IEEE Austrochip Workshop on Microelectronics, pp. 7-12, 2016.
- [8] J.A.Prathap, T.S.Anandhi. "Digital Pulse Width Modulation Controlled DC-DC Buck Converter using VHDL Coding." Journal of Analog and Digital Devices 2, no. 1 (2017).
- [9] C.S.Wu, H.H.Lee, P.H.Chen, W.Hwang, “Digital Buck Converter With Switching Loss Reduction Scheme for Light Load Efficiency Enhancement”, IEEE Transactions on

Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, Vol.25(2), pp.783-787, 2017.

- [10] Daniel Hart, “Power Electronics”, McGraw-Hill, 2010.
- [11] R.W.Erickson, D.Maksimovic, “Fundamentals of Power Electronics”, 2001.