

Gerilim ve akım kontrollü düşürücü tip dönüştürücü tasarımı ve uygulaması

Design and implementation of voltage and current controlled buck converter

Tolga ÖZER*¹ , Atakan KABOĞLU¹ 

¹Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 03000, Afyonkarahisar

• Geliş tarihi / Received: 07.12.2022

• Kabul tarihi / Accepted: 12.05.2023

Öz

Bu çalışmada gerilim ve akım kontrollü düşürücü tip dönüştürücü devresinin tasarımı ve uygulaması gerçekleştirilmiştir. Alçaltıcı tip dönüştürücü devresinin giriş ve çıkış gerilimleri sırasıyla 20-24V ve 5V olarak tasarlanmıştır. Devrenin tasarımı çıkış akımı 10 Amper'e dayanabilecek şekilde gerçekleştirilmiştir. Simülasyon ve gerçek zamanlı uygulamada mikrodenetleyici olarak PIC16F877, anahtarlama elemanı olarak ise IRFZ44N tip MOSFET kullanılmıştır. Geliştirilen devrenin anahtarlama frekans değeri 10kHz olarak belirlenmiştir. Devre tasarımında MOSFET sürücü entegresi olarak IR2101 kullanılmıştır. Tasarım aşamasında belirlenen değerlere göre komponentler seçilmiş olup devrenin ilk etapta simülasyon uygulaması gerçekleştirilmiştir. Simülasyon ortamında geliştirilen model ile tasarlanan DA düşürücü çeviricinin simülasyon ve deneysel verileri karşılaştırılmış ve sonuçların birbirini desteklediği gözlenmiştir. Simülasyon ve gerçek zamanlı devre uygulamasında 0.5Ω ile 4.8Ω değerleri arasında yedi farklı durum için yük testleri gerçekleştirilmiştir. Hem simülasyon hem de deneysel olarak PWM sinyalleri, yük akımı ve yük gerilimi değerleri gözlenmiştir. Gerçek zamanlı devre uygulamasında sistemin verim değerleri %70-%77 aralığında elde edilmiştir. Böylelikle geliştirilen gerilim ve akım kontrollü düşürücü tip dönüştürücü devresinin başarılı bir şekilde simülasyonu ve uygulaması gerçekleştirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Akım denetimi, Düşüren Dönüştürücü, Gerilim denetimi, PIC16F877 Mikrodenetleyici, PWM

Abstract

In this study, the voltage and current-controlled buck converter circuit design and implementation was carried out. The input and output voltages of the buck converter circuit were designed as 20-24V and 5V, respectively. The design of the circuit was carried out so that the output current could be withstand 10 Amperes. PIC16F877 is used as a microcontroller, and IRFZ44N type MOSFET is used as a switching element in simulation and real-time application. The switching frequency value of the developed circuit is determined as 10kHz. IR2101 is used as the MOSFET driver IC in the circuit design. Components were selected according to the determined values during the design phase. The simulation and experimental data of the designed DC step-down converter were compared. It was observed that the results supported each other. It has been ensured that the systems work in harmony with each other. The load tests were performed for seven situations between 0.5Ω and 4.8Ω values in the simulation and real-time circuit application. PWM signals, load current, and load voltage values were observed both in simulation and experimentally. The efficiency values of the system were obtained in the range of 70%-77% in the real-time circuit application. Thus, a successful simulation and application of the developed voltage and current controlled buck converter circuit was realized.

Keywords: Current controlled, Buck Converter, Voltage controlled, PIC16F877 Microcontroller, PWM

*Tolga ÖZER; tolgaozer@aku.edu.tr

1. Giriş

1. Introduction

Enerji, insanoğlunun vazgeçilmezleri arasında yer almaktadır. Geçmişten günümüze uluslar enerji için birbirleri ile rekabet içerisinde bulunmaktadır. Günümüzde elektrik enerjisine hemen hemen her alanda ihtiyaç duyulmaktadır. Elektrik enerjisi insanoğlunun yaşantısında çok büyük bir öneme sahip olup, kullandıkları çoğu eşyada yer almaktadır. Artmakta olan insan nüfusu ve elektriğe olan talep nedeni ile elektrik üretim kapasiteleri arttırılmaktadır. Üretilen elektrik, enerji iletim hatları vasıtasıyla konutlarımıza kadar ulaştırılmaktadır (Cebeci & Yaşa, 2016). Konutlara ulaştırılan elektrik 220V gerilim genliğinde alternatif akım (AA) formundadır. Ancak kullanılan elektronik eşyaların besleme gerilimleri alternatif veya doğru gerilim olmak üzere değişkenlik gösterebilmektedir. Bu nedenle elektrik sinyalinin formunun ya da genliğinin farklı değer aralıklarına dönüştürülmesi gerekebilmektedir. Bu işlemin gerçekleştirilmesi için ise güç kaynakları kullanılmaktadır (Liu vd., 2020). Güç kaynakları yapısal olarak ikiye ayrılır. Bunlar doğrusal (lineer) güç kaynakları ve anahtarlamalı mod güç kaynaklarıdır. Doğrusal güç kaynaklarında şebekeden alınan AA gerilimin genliği transformatör yardımı ile değiştirilebilmektedir. AA gerilimi, diyotlar ile kurulu köprü tipi tam dalga doğrultma devresi ile doğru akım (DA) gerilimine dönüştürülmektedir. DA gerilimine, filtre ve regüle devreleri uygulanarak çıkışta istenilen seviyede regüleli DA gerilim elde edilebilmektedir (Evrans, 2019). Bu tip devrelerde transformatörün bulunması, kayıp güçlerin ısı olarak harcanması nedeni ile soğutuculara ihtiyaç duyulmasından dolayı doğrusal güç kaynakları daha büyük ve daha ağır olmaktadır (Köse vd., 2017). Aynı zamanda kayıp güçlerin fazla olmasından dolayı verimleri düşüktür. Yükün ihtiyaç duyduğu gerilim, anahtarlamalı güç kaynakları tarafından da sağlanabilmektedir. Anahtarlamalı güç kaynakları yüksek frekanslarda çalışırlar ve DA'dan DA'a gerilim genliğinde dönüşümü gerçekleştirirler. Bu devre mantığında yüksek frekanslarda çalışabilen anahtarlama elemanları (MOSFET, transistör) kullanılır. Bu tip devrelerde kayıp güç az olduğundan verimleri yüksektir (Çalışkan vd., 2017). Bunun yanında hacimsel olarak küçük ve ağırlıkları düşük seviyelerdedir. Düşürücü tip devre topolojisi anahtarlamalı güç kaynakları sınıfından biri olup uygulamalarda sıklıkla tercih edilmektedir. DA'dan DA'a alçaltıcı tip dönüştürücü devre topolojisinde giriş gerilimi, anahtarlama elemanın iletimde ve kesimde tutulma süresi değiştirilerek ayarlanabilmektedir. Giriş geriliminin seviyesi düşürülerek çıkışa aktarılmaktadır. Devrenin çıkışındaki gerilim seviyesi anahtarlama elemanın iletimde ve kesimde olma süresi ile ilişkilidir. Anahtarlama elemanı kontrol devresi ile sürülmektedir ve böylelikle çıkışta istenilen gerilim seviyesi elde edilir (Kim vd., 2014). Babaoğlu ve Salihmuhsin, (2016) yapmış oldukları çalışmada DA-DA düşürücü dönüştürücü devre tasarımında kontrol devresi için oransal (Proportional - P) kontroller kullanılarak gerçek zamanlı düşürücü dönüştürücü tasarımı yapılmaktadır. Bu çalışmada; giriş gerilimi 20-30V aralığında farklı yük değerleri ile yüklenmesi durumuna karşı çıkış gerilimi sabit 15V olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu tasarımın kontrol devresinde PIC18 serisi bir mikrodenetleyici kullanılmıştır (Babaoğlu & Salihmuhsin, 2016). Mamur (2012) yapmış olduğu bu çalışmada kararlı ve yük değişimlerinden etkilenmeyen bir çıkış gerilimi üreten DA-DA düşürücü dönüştürücü devre tasarımını gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada paralel çalışabilmesi ve programlama üstünlüğünden dolayı kontrol devresinde Alanda Programlanabilir Kapı Dizileri (Field Programmable Gate Array - FPGA) kullanılmıştır. Bu çalışmada anahtarlama elemanı olarak IGBT kullanılmış olup FPGA üzerinden ADC okuma yapılarak akım ve gerilim kontrolü yapılmaktadır (Mamur, 2012). Ürgün vd. (2008) yapmış oldukları çalışmada temel DA-DA düşürücü dönüştürücü güç kaynağının teorik olarak analizini ve simülasyon ortamında tasarımını gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada maliyeti düşürmek adına düşürücü dönüştürücünün kontrol devresinde DsPIC mikrodenetleyici kullanılmıştır (Ürgün vd., 2008). Özer ve Kelebekler (2021) yapmış oldukları çalışmada TS-EN 61000-3-2 standartlarının gerekliliğini dikkate alarak DA-DA düşürücü dönüştürücü güç kaynağı tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada DA-DA düşürücü dönüştürücünün şebekede oluşturdukları harmoniklerin TS-EN 61000-3-2 standartlarına uygun hale getirilmesi amaçlanmıştır (Özer & Kelebekler, 2021). Özdemir (2018) yapmış olduğu çalışmada sürekli iletim modunda çalışan bir DA-DA düşürücü dönüştürücü güç kaynağı tasarımı gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada sürekli akım modunda çalıştırılan DA-DA düşürücü dönüştürücüler için ayırık zamanda üç ayrı tip kontrolör tasarımı yapılmaktadır (Özdemir, 2018). Birkan (2021) yapmış olduğu bu çalışmada DA-DA düşürücü dönüştürücü devresini matematiksel olarak modellemiş ve benzetim modelini MATLAB/Simulink ortamında oluşturmuştur. Benzetim çalışması sonucunda düşürücü dönüştürücünün çalışma prensibi ve sürekli durumdaki kararlılık analizi açıklanmıştır (Birkan, 2021).

Bu çalışmada giriş gerilimi 20-24V aralığında çıkış gerilim değeri 5V olacak şekilde 50W'lık gerilim ve akım kontrollü bir düşürücü tip dönüştürücü tasarımı gerçekleştirilmiştir. Devre yapısını oluşturan bileşenler hesaplanmış ve tasarım öncelikle simülasyon programı ile test edilmiştir. Tasarım simülasyon programında gerçekleştirildikten sonra uygulama aşamasına geçilmiştir. Tasarlanan dönüştürücü devresinin simülasyon ve

gerçek zamanlı ortamda farklı yüklerdeki tepkisi incelenerek sistemin başarılı bir şekilde çalıştırılması gerçekleştirilmiştir.

2. Materyal ve metot

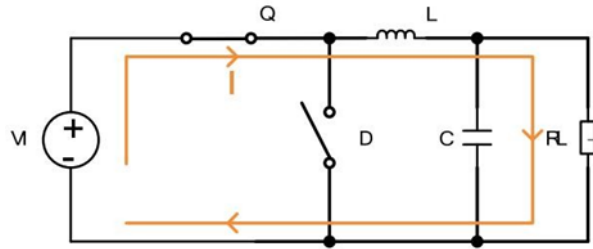
2. Material and method

2.1. Düşürücü tip dönüştürücü

2.1. Buck type converter

Anahtarlamalı mod DA-DA düşürücü dönüştürücü güç kaynakları diğer adıyla azaltan dönüştürücü, girişine uygulanan DA gerilimini çıkışında daha düşük bir DA gerilimine düşürme işlemini gerçekleştirirler. Temel olarak bir düşürücü dönüştürücü devresinde anahtarlama elemanı (MOSFET, transistör), hızlı diyot, bobin ve kondansatör bulunur. Bu devre topolojisinde anahtarlama elemanı kullanılarak çıkışta, girişten küçük olma koşulu ile istenilen gerilim seviyesi elde edilir. Azaltan dönüştürücülerin topolojisinde kontrol devresi bulunur ve bu devre ile anahtarlama elemanı olan MOSFET anahtarlanır. Anahtarlama elemanın iletimde ve kesimde olmasıyla iki durum söz konusu olmaktadır.

MOSFET iletimde iken (On State): Bu durumda giriş akımı MOSFET üzerinden akar ve MOSFET kısa devre olarak düşünülebilir. Diyotun devredeki bağlantı durumundan dolayı diyot açık devre olmaktadır. MOSFET'den akan akım bobin, kondansatör ve yük direnci üzerinden devresini tamamlar ve bu süre boyunca bobin ve kondansatör enerji depolarlar ve yük direnci üzerinde gerilim düşümü olur. Anahtarlama elemanının iletimde olduğu süre t_{on} , kesimde olduğu süre t_{off} 'tur. Anahtarlama elemanının çalışma periyodu (iletim ve kesimde olduğu süre) ise T 'dir.



Şekil 1. MOSFET'in iletimde olduğu durum

Figure 1. The state of the MOSFET in conduction

Görev oranı DA-DA düşürücü dönüştürücülerde anahtarlama elemanının ne kadar süre iletimde ne kadar süre kesimde olacağını belirler. Başka bir ifade ile Darbe Genişlik Modülasyonu (Pulse Width Modulation - PWM) kontrol sinyalinin doluluk oranını verir. Görev oranı (Duty Cycle - D) eşitliği (1) numaralı denkleme görülmektedir.

$$D = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} = \frac{t_{on}}{T}, t_{on} = DT, t_{off} = (1 - D)T \quad (1)$$

DA-DA düşürücü dönüştürücü devresi analiz edildiğinde; $0 \leq t \leq DT$ süresinde MOSFET'in iletimde, diyotun kesimde olması durumunda bobin akımındaki değişim (2), (3) ve (4) numaralı denklemlerde sırasıyla ifade edilmiştir.

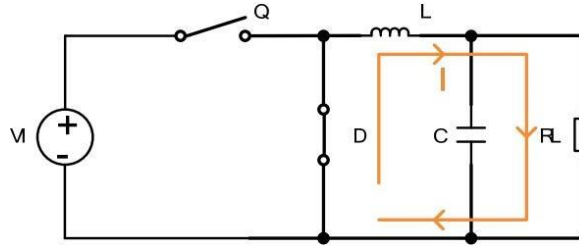
$$V_L = V_{in} - V_o = L \frac{di_L}{dt} \quad (2)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{\Delta i_L}{\Delta DT} = \frac{V_{in} - V_o}{L} \quad (3)$$

$$\Delta i_{L(iletim)} = \left(\frac{V_{in} - V_o}{L} \right) DT \quad (4)$$

MOSFET Kesimde İken (Off State): MOSFET kesime alındığında açık devre olur ve üzerinden akım akmaz. Bu durumda diyot iletme geçer ve kısa devre olarak düşünülebilir. Bobin ve kondansatör üzerinde depolanan

enerji bu durumda diyot üzerinden devresini tamamlayarak deşarj olurlar. MOSFET'ler yüksek anahtarlama frekansları ile çalıştırılarak yüksek hızlarda anahtarlama yaparlar. Düşürücü tip dönüştürücü devresinin çalışma modları Şekil 1 ve Şekil 2'de gösterilmektedir.



Şekil 2. MOSFET'in kesimde olduğu durum
Figure 2. The state of the MOSFET on cut

$DT \leq t \leq T$ süresinde MOSFET'in kesimde, diyotun iletimde olması durumunda bobin akımındaki değişim (5), (6) ve (7) numaralı denklemlerde sırasıyla gösterilmiştir.

$$V_L = -V_o = L \frac{di_L}{dt} \quad (5)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{\Delta i_L}{\Delta(1-D)T} = \frac{-V_o}{L} \quad (6)$$

$$\Delta i_{L(kesim)} = \left(\frac{-V_o}{L}\right)(1-D)T \quad (7)$$

Sürekli çalışma durumunda;

$$\Delta i_{L(iletim)} + \Delta i_{L(kesim)} = 0 \quad (8)$$

olduğundan dolayı (8) numaralı denkleme (4) ve (7) numaralı bağıntıların eklenmesi ile;

$$\left(\frac{V_{in}-V_o}{L}\right)DT + \left(\frac{-V_o}{L}\right)(1-D)T = 0 \quad (9)$$

(9) numaralı denklem elde edilmiştir. Sadeleştirme işleminin yapılması sonucunda;

$$D = \frac{V_o}{V_{in}} \quad (10)$$

Görev oranı (10) numaralı bağıntıda elde edilmiştir. Denklemlerde yer alan sembollerin açıklaması aşağıda yer almaktadır.

V_{in} : giriş gerilimi, V_o : çıkış gerilimi, V_L : bobin gerilimi, di_L : bobin akımındaki değişim, dt : zamandaki değişimi, D : görev oranı, L : endüktans değeri, T : anahtarlama elemanının periyodu

DA-DA düşürücü dönüştürücü Sürekli Akım Koşulu (Continuous Current Mode - CCM) ve Süreksiz Akım Koşulu (Discontinuous Current Mode - DCM) modları olmak üzere iki farklı modda çalışabilmektedir. Sürekli akım koşulunda endüktans akımı 0A'e düşmemektedir ancak süreksiz akım koşulunda endüktans akımı 0A'e düşmektedir. Sürekli akım koşulu (CCM) denklem (11)'de, süreksiz akım koşulu (DCM) Denklem (12)'de verilmektedir.

$$\frac{\Delta i_L}{2} < I_{o(min)} \quad (11)$$

$$\frac{\Delta i_L}{2} > I_{o(min)} \quad (12)$$

$I_{o(min)}$: yük altındaki minimum çıkış akımı, ΔI_L : bobin akımındaki tepeden tepeye dalgalanma

Denklem (11) ve (12) incelendiğinde düşürücü dönüştürücünün sürekli akım koşulunda (CCM) çalışması için yük altındaki minimum çıkış akımının, endüktans akımındaki dalgalanmanın yarısından büyük olmalıdır. Bu koşul sağlanırsa düşürücü dönüştürücü sürekli akım koşulunda çalışmaktadır. Bu nedenle devreye bağlanan yükün değeri önem arz etmektedir.

$$I_o = \frac{V_o}{R} \quad (13)$$

Düşürücü dönüştürücünün CCM koşulunda çalışması için yük değeri, denklem (14)'te elde edilen $R_{(kritik)}$ değerinden küçük olmalıdır. ($R < R_{(kritik)}$)

$$R_{(kritik)} = \frac{2L}{(1-D)T} \quad (14)$$

2.2.Düşürücü tip dönüştürücü güç kaynağının tasarımı

2.2.Design of buck converter power supply

Bu çalışmada giriş gerilimi 20-24V aralığında çıkış gerilimi 5V ve yük akımı 10A için DA-DA düşürücü tip dönüştürücü devresinin devre elemanlarının değerleri hesaplanmıştır. DA-DA azaltan dönüştürücü de görev oranı, çıkış geriliminin giriş gerilimine oranı ile elde edilir. D görev periyodu, V_o çıkış gerilimi, V_{in} giriş gerilimi olarak sembolize edilmiş ve Denklem (15)'de verilmiştir.

$$D = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{5}{24} = 0.208 \quad (15)$$

DA-DA azaltan dönüştürücüde giriş gerilimi, anahtarlama elemanın görev oranı süresi ile iletimde olmasıyla çıkış gerilimine düşürülmektedir. Denklem (15) incelendiğinde düşürücü tip dönüştürücüler için D değerinin 0 ile 1 arasında yer aldığı görülmektedir. DA-DA düşürücü dönüştürücü devresinde bulunan bobin, akımın dalgalanma miktarını belirlemektedir. Bobinin endüktans değeri denklem (16)'da ifade edildiği gibi bulunabilmektedir. L endüktansı, D görev döngüsünü, f_s anahtarlama frekansını, V_{in} giriş gerilimini, V_o çıkış gerilimini ve ΔI_o çıkış akımındaki dalgalanma oranını sembolize etmektedir.

$$L = \frac{(V_{in}-V_o)*D}{f_s*\Delta I_o} = \frac{(24-5)*0.208}{10000*2} = 198\mu H \quad (16)$$

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde ΔI_o değeri %20 - %40 aralığında olduğu görülmektedir (Hauke, 2015). Bu çalışmada ΔI_o değeri %20 olacak şekilde belirlenerek ilgili hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Teorik olarak yapılan hesaplamalarda devrede kullanılması gereken minimum endüktans değeri $198\mu H$ 'dir. Tasarlanan devrede kullanılan bobinin endüktans değeri ise $220\mu H$ 'dir. DA-DA düşürücü dönüştürücü devresinde bulunan kondansatör gerilimin dalgalanma miktarını belirlemektedir. Kondansatörün kapasite değeri denklem (17)'de verilen eşitlikten faydalanılarak bulunabilmektedir. C kapasite, f_s anahtarlama frekansı, ΔI_o çıkış akımındaki dalgalanma ve ΔV_o çıkış gerilimindeki dalgalanma sembolleri olarak verilmiştir.

$$C = \frac{\Delta I_o}{8*f_s*\Delta V_o} = \frac{2}{8*10000*0.05} = 500\mu F \quad (17)$$

Alçaltıcı tip dönüştürücü devresi uygulamalarında ΔV_o değerinin %1 oranında belirlenerek tasarımlar gerçekleştirilebilmektedir (Hauke, 2015). Bu çalışmada da literatürdeki benzer çalışmalar dikkate alınarak ΔV_o , %1 olarak belirlenmiş ve ilgili hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Teorik olarak yapılan hesaplamalarda devrede kullanılması gereken kapasite değeri $500\mu F$ 'tır. Güç kaynağının yüklenme durumunda çıkış gerilimindeki dalgalanma artacağından dolayı uygulama devresinde kullanılan kapasitenin değeri $3300\mu F$ olarak belirlenmiştir.

Alçaltıcı tip dönüştürücü devresinin CCM modda çalışabileceği kritik yük değerinin belirlenmesi için R_{kritik} değerinin hesaplanması gerekmektedir. R_{kritik} değeri (18) numaralı bağıntı kullanılarak hesaplanabilmektedir;

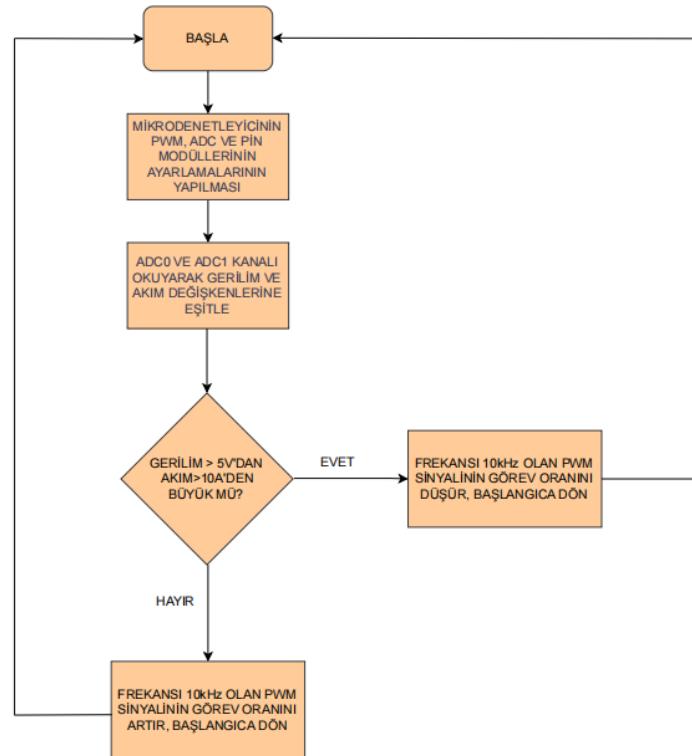
$$R_{(kritik)} = \frac{2 \cdot 220 \cdot 10^{-6}}{(1 - 0.208) \cdot 100 \cdot 10^{-6}} = 5.556 \Omega \quad (18)$$

Düşürücü dönüştürücünün CCM koşulunda çalışabilmesi için devrenin çıkışına bağlanacak yük değerinin 5.556Ω değerinden küçük olması gerekmektedir. Alçaltıcı devrenin gerçek zamanlı testlerinde devrenin çıkışına 0.5Ω ile 4.8Ω arasında farklı değerlere sahip yükler bağlanarak testler CCM modda gerçekleştirilmiştir.

2.3. Düşürücü tip dönüştürücünün kontrol algoritması

2.3. Control algorithm of the buck converter

Yapılan bu uygulamada gerilim kontrolünü sağlamak için iki adet $10k\Omega$ 'luk dirençler kullanılarak düşürücü dönüştürücünün çıkışında gerilim bölücü direnç devresi kullanılmıştır. Devrenin çıkış gerilimi $5V$ 'tur. Çıkışa paralel birbiriyle seri olan iki adet $10k\Omega$ 'luk dirençlerden birinin üzerine $2.5V$ gerilim düşümü meydana gelmektedir. Dirençlerin orta noktasından PIC16F877A'nın RA0 analog pinine bağlantı yapılarak çıkış geriliminin değeri belirlenmektedir. PIC16F877A'nın analog pinleri 10 bitlik çözünürlüğe sahiptir. Çıkıştaki analog gerilim değeri $5V$ olduğunda dijital karşılığı 1023 'e eşit olmaktadır. Gerilim bölücü direnç üzerinde $2.5V$ gerilim düşümü meydana gelir ve bu gerilimin dijital karşılığı 512 'dir. Gerilim bölücü dirençlerden okunan değerin 253 ve 512 değerleri arasında kıyaslanması sonucu PWM sinyalinin görev periyodunun ayarlanması gerçekleştirilir. Böylelikle çıkış gerilimi değerinin minimum $2.5V$ olması sağlanırken sabit $5V$ 'da kalacak şekilde PWM ayarlaması yapılır. Düşürücü tip dönüştürücü devresinde akım kontrolü yüke seri olarak bağlı $22m\Omega$, $5W$ 'lık taş bir direnç ile yapılmıştır. Yüke bağlı seri direncin üzerine düşen gerilimin okunması için PIC16F877A'nın RA1 pinine bağlantı gerçekleştirilmiştir. Devrenin tasarımında çıkışından yükü besleyebilecek maksimum akım değeri $10A$ olarak belirlenmiştir. Yük akımının $10A$ 'i geçmesi durumunda akım koruması devreye girmektedir. Yüke bağlı seri taş direnç üzerinden maksimum $10A$ geçmesi durumunda taş direnç üzerinde $220mV$ gerilim düşümü meydana gelmektedir. $220mV$ gerilimin dijital karşılığı 45 'e eşit olmaktadır. Akım kontrolü, taş direnç üzerinden okunan değerin 45 değeri ile kıyaslanması ile gerçekleştirilir. Okunan değere göre PWM sinyalinin görev periyodu değiştirilir. DA-DA düşürücü dönüştürücü güç kaynağında ADC (Analog-Dijital Dönüştürücü) değer okuma işlemi yapılarak PWM sinyalinin oluşturulması için yazılan kodun algoritması Şekil 3'te verilmiştir.

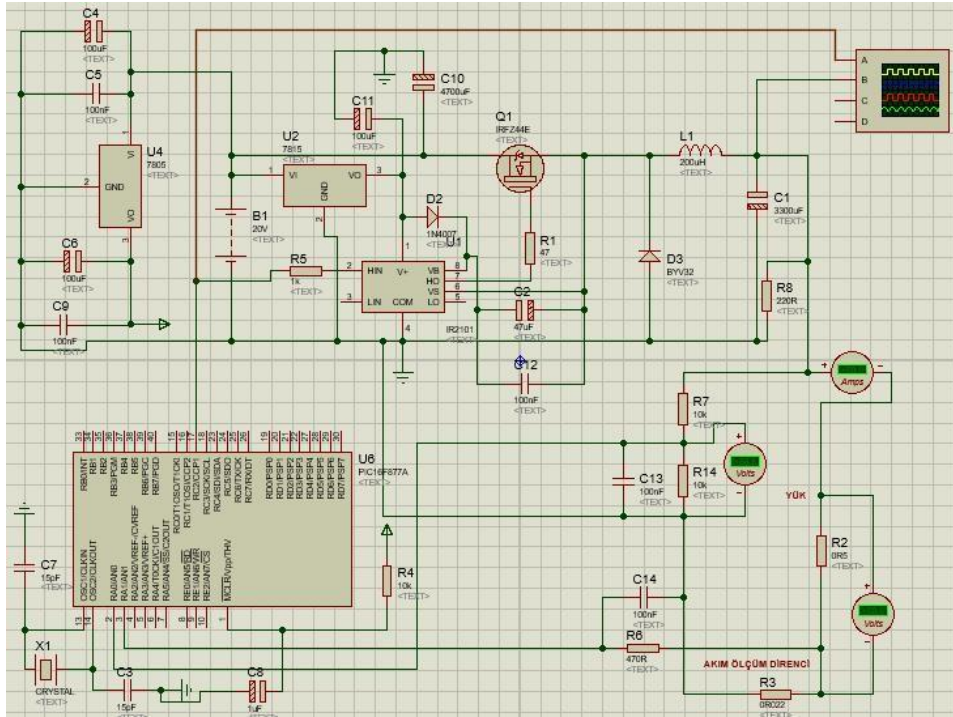


Şekil 3. Düşürücü tip dönüştürücü devresinin kontrol algoritması
Figure 3. Control algorithm of the buck converter circuit

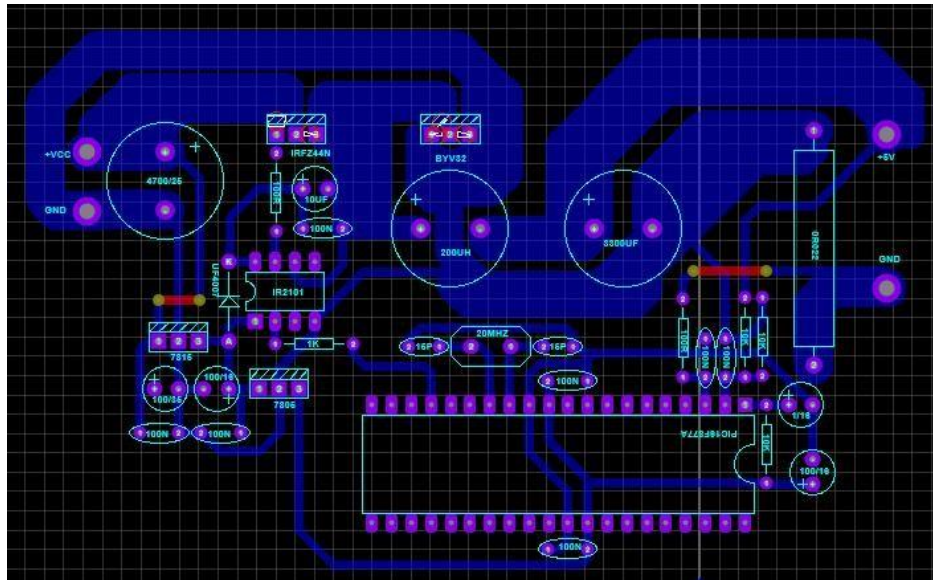
2.4. Düşürücü tip dönüştürücü güç kaynağının simülasyonu

2.4. Simulation of buck converter power supply

DA-DA düşürücü dönüştürücü güç kaynağının devresi Proteus programı üzerinde kurularak devrenin simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Simülasyon uygulamasında mikrodenetleyici olarak PIC16F877 entegresi kullanılmıştır. Yarı iletken anahtarlama elemanı olarak düşük iç direncinin olmasından dolayı IRFZ44N tip MOSFET seçilmiştir. Geliştirilen devrenin anahtarlama frekans değeri 10kHz olarak belirlenmiştir. Devre tasarımında MOSFET sürücü entegresi olarak IR2101 kullanılmıştır. Geliştirilen düşürücü tip dönüştürücü devresinin şeması Şekil 4'te görülmektedir. Tasarlanan sisteme göre devrenin baskı devresi ARES programında gerçekleştirilmiştir. Tasarımda yüksek akımın geçeceği yolların yüzey alanı geniş olacak şekilde tasarlanmıştır. Düşürücü dönüştürücünün baskı devresi Şekil 5'te gösterilmektedir.



Şekil 4. Düşürücü tip dönüştürücü devresinin Proteus programı simülasyonu
Figure 4. Proteus program simulation of buck converter circuit

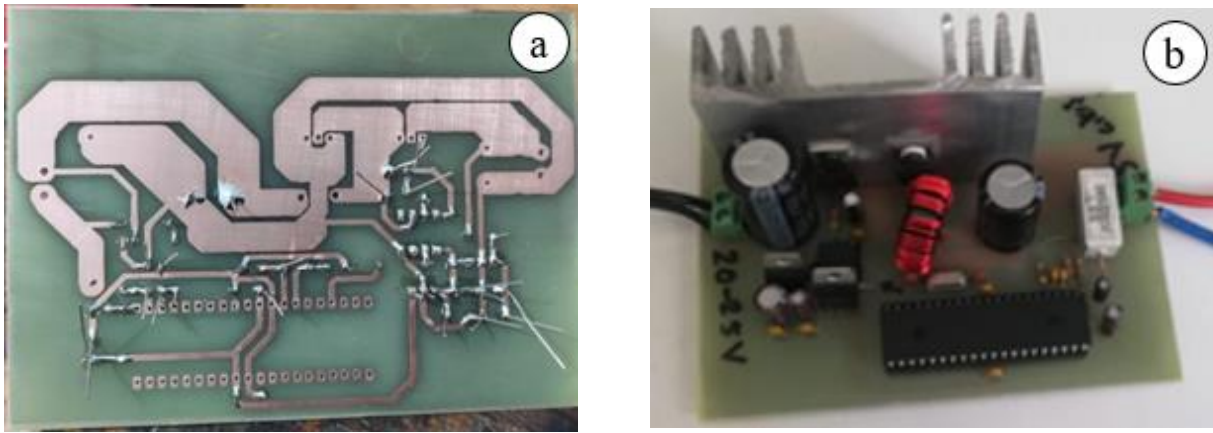


Şekil 5. ARES devre çizimi
Figure 5. ARES circuit drawing

2.5. Düşürücü tip dönüştürücü güç kaynağının uygulaması

2.5. Implementation of buck converter power supply

Mikrodenetleyici PIC16F877A ve IR2101 entegresini besleyebilmek için +5V ve +15V gerilim değerlerine ihtiyaç duyulmuştur. Devrenin girişinden uygulanan 20-24 V gerilimden, LM7805 ve LM7815 gerilim entegrelerini kullanılarak sabit +5V, +15V gerilimler elde edilmiştir. PIC 16F877A ve IC2101 entegrelerinin beslemeleri bu gerilimlerle gerçekleştirilmiştir. Düşürücü tip dönüştürücü devresinde hızlı tipteki BYV32 diyotu kullanılmıştır. MOSFET ve hızlı diyotta istenilirse de kayıplar meydana gelecektir ve bu kayıplar ısı olarak etkisini gösterecektir. Bu durumu önlemek adına düşürücü tip dönüştürücü devresinde MOSFET ve hızlı diyot soğutucu panele takılarak devreye yerleştirilmiştir. Dönüştürücü devresinin girişinde anlık kesilmeler meydana gelmesi durumunda devrenin çalışmasını etkilememesi için giriş kondansatörü kullanılmıştır. Baskı devrenin üretilerek komponentlerin lehimlenmesi aşaması ve devrenin tamamlanmış hali Şekil 6'da görülmektedir.



Şekil 6. (a) Baskı devrenin üretilerek komponentlerin lehimlenmesi, (b) Devrenin tamamlanmış hali.

Figure 6. (a) Production of the printed circuit board and soldering of the components, (b) Completed circuit

3. Bulgular

3. Results

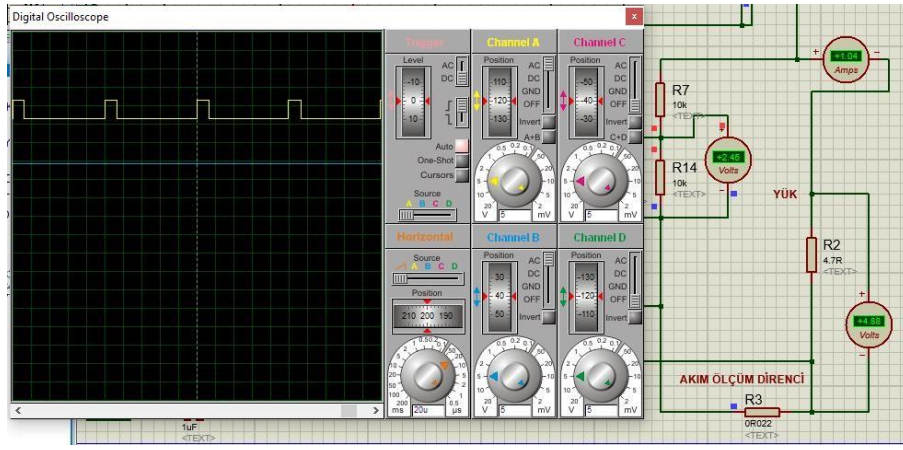
Bu bölümde tasarlanan düşürücü tip dönüştürücü güç kaynağının simülasyon ve gerçek zamanlı testlerden elde edilen sonuçlara yer verilmiştir. Gerçek zamanlı teste geliştirilen düşürücü tip güç kaynağına farklı değerlerdeki yükler bağlanarak devrenin çıkışından elde edilen gerilim, akım ve verim sonuçları incelenerek analizler gerçekleştirilmiştir.

3.1. Düşürücü tip dönüştürücü devresinin Proteus simülasyonunda test edilmesi

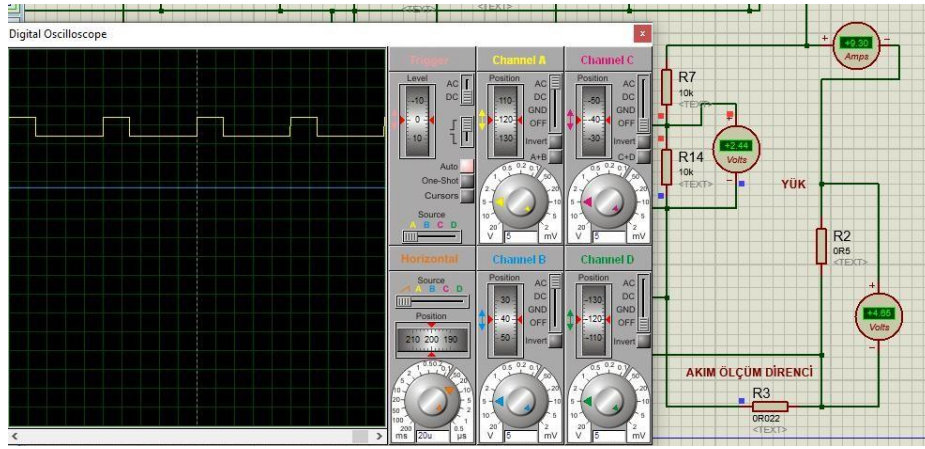
3.1. Testing the buck converter circuit in Proteus simulation

Bu bölümde DA-DA düşürücü tip dönüştürücü güç kaynağının Proteus programındaki simülasyon devresinden elde edilen sonuçlar verilmiştir. Simülasyon devresinde 4,7Ω ile 0,5Ω aralığındaki yedi farklı değişken yükteki PWM sinyali, akım ve gerilim değeri sonuçları incelenmiştir. Simülasyonda yer alan sarı sinyal MOSFET'i sürmek için kullanılan PWM sinyalidir. Mavi sinyal ise çıkış gerilimini vermektedir. Simülasyonda yapılan test sonucunda devreye 4.7Ω yük bağlanması durumunda çıkış gerilimi 4.88V, yük akımı 1.04A olarak Şekil 7'deki gibi ölçülmüştür.

Tasarlanan DA-DA düşürücü dönüştürücü güç kaynağının Proteus simülasyonuna 0.5Ω yük bağlayarak test sonucunda elde edilen ölçümler not edilmiştir. Simülasyonda yer alan sarı sinyal MOSFET'i sürmek için kullanılan PWM sinyalidir. Mavi sinyal ise çıkış gerilimini vermektedir. Simülasyonda yapılan test sonucunda devreye 0.5Ω yük bağlanması durumunda çıkış gerilimi 4.65V, yük akımı 9.3A olarak Şekil 8'deki gibi ölçülmüştür.



Şekil 7. Proteusta $R_L = 4.7\Omega$ yük testi
Figure 7. $R_L = 4.7\Omega$ load test in Proteus



Şekil 8. Proteusta $R_L = 0.5\Omega$ yük testi
Figure 8. $R_L = 0.5\Omega$ load test in Proteus

DA-DA düşürücü dönüştürücü güç kaynağı devresi simülasyon ortamında farklı yükler ile beslenmesi durumunda çıkış gerilimi ve çıkış akımları not edilmiştir. Test sonucunda elde edilen ölçümler Tablo 1’de verilmektedir.

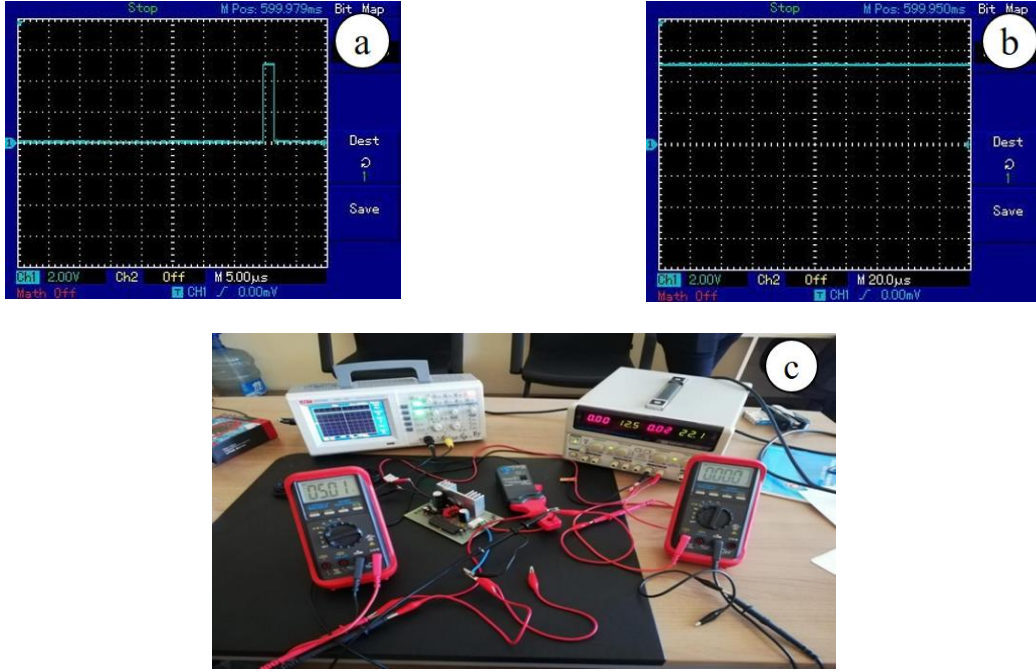
Tablo 1. Simülasyon ortamında farklı yüklerle gerçekleştirilen testlerin sonuçları
Table 1. Results of tests performed with different loads in the simulation environment

Giriş gerilimi	Çıkış gerilimi	Çıkış akımı	Ryük (Ω)	Çıkış gücü
22V	4.88V	1.04A	4.7 Ω	5.07W
22V	4.92V	1.97A	2.5 Ω	9.69W
22V	4.86V	3.24A	1.5 Ω	15.75W
22V	4.95V	4.13A	1.2 Ω	20.44W
22V	4.83V	6.03V	0.8 Ω	29.12W
22V	4.96V	7.08A	0.7 Ω	35.12W
22V	4.65V	9.3A	0.5 Ω	43.24W

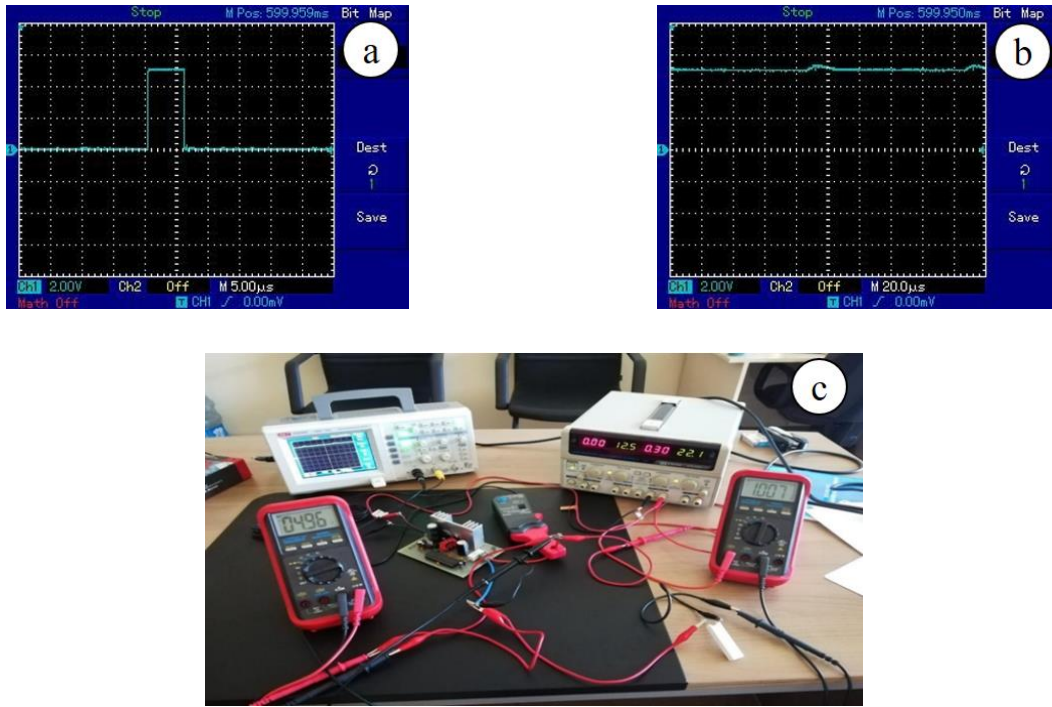
3.2. Düşürücü tip dönüştürücü devresinin gerçek zamanlı olarak test edilmesi

3.2. Real-time testing of buck converter circuit

DA-DA düşürücü dönüştürücü güç kaynağının yüksüz şekilde boşa çalışması test edilmiştir. Çıkış gerilimi multimedre ile ölçülmüştür. Osiloskoptan PWM sinyali ile çıkış geriliminin sinyal çıktıları Şekil 9'da verilmiştir. Çıkış geriliminin değerinin 5.01V olduğu verilen şekilden görülmektedir.

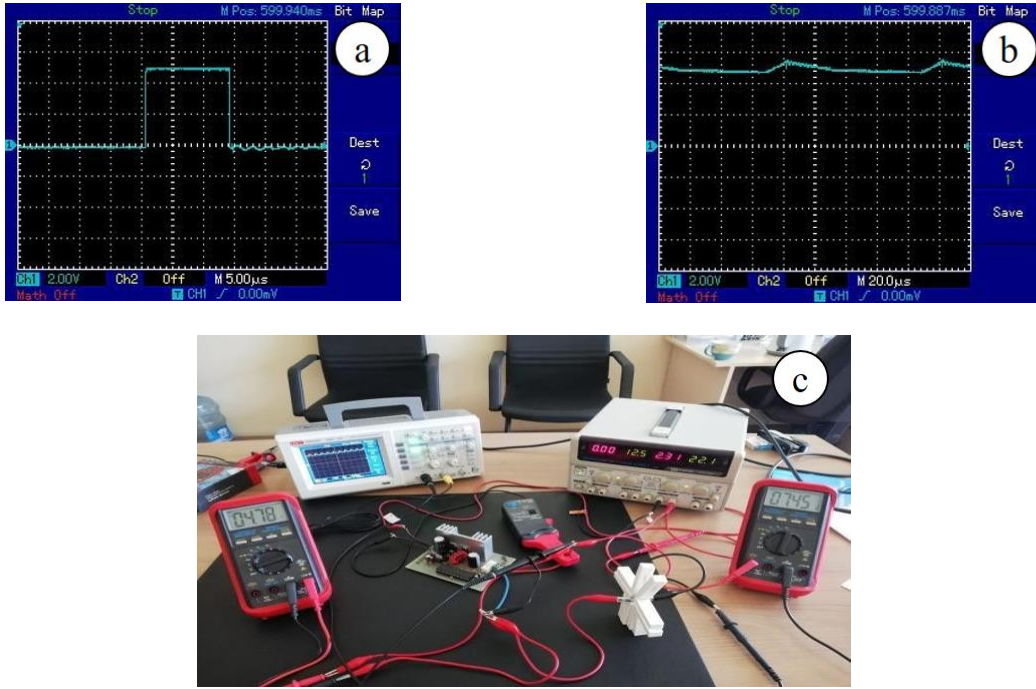


Şekil 9. Yüksüz çalışma testi, (a) PWM sinyali, (b) Çıkış gerilimi, (c) Devrenin bağlantısı
Figure 9. No-load test, (a) PWM signal, (b) Output voltage, (c) Circuit connection



Şekil 10. 4.8Ω Yük testi, (a) PWM sinyali, (b) Çıkış gerilimi, (c) Devrenin bağlantısı
Figure 10. 4.8Ω Load test, (a) PWM signal, (b) Output voltage, (c) Circuit connection

DA-DA düşürücü dönüştürücü güç kaynağının çıkışına 4.8Ω'lık yük bağlanarak test edilmiştir. Burada çıkış gerilimi ve çıkış akımı multimetre ile ölçülmüştür. Multimetre gerilim ölçümü için devreye paralel, akım ölçümü için ise devreye seri olarak bağlanmıştır. Ölçüm sonucunda PWM ile çıkış gerilimi sinyallerinin osiloskop çıktıları elde edilmiştir. V_o ve I_o değerleri sırası ile 4.96V, 1.007A olarak ölçülmüştür. Elde edilen osiloskop görüntüleri ile deneysel düzenek Şekil 10'da verilmiştir.



Şekil 11. 0.6Ω Yük testi, (a) PWM sinyali, (b) Çıkış gerilimi, (c) Devrenin bağlantısı
Figure 11. 0.6Ω Load test, (a) PWM signal, (b) Output voltage (c) Circuit connection

DA-DA düşürücü dönüştürücü güç kaynağının çıkışına 0.6Ω'lık yük bağlanarak test edilmiştir. Çıkış gerilimi ve çıkış akımı multimetre ile ölçülmüştür. Ölçüm sonucunda PWM ile çıkış gerilimi sinyallerinin osiloskop çıktıları elde edilmiştir. V_o ve I_o değerleri sırası ile 4.78V, 7.45A olarak ölçülmüştür. Elde edilen osiloskop görüntüleri ile deneysel düzenek Şekil 11'de verilmiştir. Yapılan testler sonucunda elde edilen veriler Tablo 2'de verilmiştir. Bu verilere göre devrenin farklı yüklenme durumlarına göre verimi Denklem (19) kullanılarak hesaplanmıştır. η verim, V_o çıkış gerilimi, I_o çıkış akımı, V_{in} giriş gerilimi, I_{in} giriş akımı, P_{out} çıkış gücü ve P_{in} giriş gücü olarak sembolize edilmiştir.

$$\% \eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} * 100 = \frac{V_o * I_o}{V_{in} * I_{in}} * 100 \quad (19)$$

Tablo 2. Gerçek zamanlı yapılan testler sonucunda hazırlanan verim tablosu
Table 2. Efficiency table prepared as a result of real-time tests

Giriş gerilimi (V)	Giriş akımı (A)	Çıkış gerilimi (V)	Çıkış akımı (A)	Verim	Ryük (Ω)
22.1V	0.3A	4.96V	1.007A	%75.33	4.8Ω
22.1V	0.57A	4.96V	1.948A	%76.70	2.4Ω
22.1V	0.83A	4.95V	2.829A	%76.34	1.6Ω
22.1V	1.09A	4.92V	3.659A	%74.73	1.2Ω
22.1V	1.54A	4.85V	5.14A	%73.25	0.8Ω
22.1V	1.99A	4.84V	6.49A	%71.42	0.6Ω
22.1V	2.31A	4.78V	7.45A	%69.76	0.5Ω

4. Tartışma ve sonuçlar

4. Discussion and conclusions

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde alçaltıcı tip dönüştürücü devresi tasarımına yönelik farklı çalışmaların olduğu görülmektedir (Aslan, 2019). Bu çalışmalar simülasyon ortamında, gerçek zamanlı olarak veya yapısında her iki çalışma durumunu barındıracak şekilde gerçekleştirilebilmektedir (Sevim & Bozkurt, 2021). Literatürde gerçek zamanlı yapılan çalışmaların bulunmasına rağmen çalışmaların ağırlıklı olarak simülasyon tabanlı olarak ortaya koyulduğu olduğu görülmektedir (Yaylacı vd., 2022). Elde edilen bu verilerden hareketle gerçek zamanlı yapılan uygulamaların sayısının diğer çalışmalara oranla daha az olduğu anlaşılmaktadır. Dönüştürücü tabanlı çalışmalarda sağlıklı bir tasarımın gerçekleştirilebilmesi için öncelikle sisteme ait simülasyonun gerçekleştirilmesi ve sonrasında uygulamasının yapılması ideal tasarım aşamaları olarak ifade edilebilir (Özdemir, 2018). Literatürde her iki adımı da yapısında bulunduran çalışmalara daha az rastlanabilmektedir. Yasko (2018) çalışmasında alçaltıcı bir devrenin simülasyonunu Matlab'da yaparak uygulamasını Arduino tabanlı olarak gerçekleştirmiştir. Önerilen çalışmada Proteus programı aracılığı ile simülasyon ortamında dönüştürücü sisteminin tasarımı yapılmıştır. PIC mikrodenetleyici tabanlı gerçek zamanlı uygulaması başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Böylelikle literatürde az sayıda bulunan simülasyon ve gerçek zamanlı devre tasarımını içeren çalışmalara katkıda bulunulmuştur.

Elektronik devrelerin tasarımlarında Proteus, Matlab, PSIM, LtSpice, Multisim vb. gibi simülasyon programları kullanılabilir (Alagöz vd., 2013; Aslan, 2019). Simülasyon aşamasının sorunsuz şekilde gerçekleştirilmesi gerçek zamanlı sistemde problem yaşanması riskini en aza indirmektedir. Dönüştürücü tip devrelerde kontrol sinyallerinin oluşturulabilmesi için genellikle mikrodenetleyiciler tercih edilmektedir. Devrede bulunan mikrodenetleyici tabanlı kontrol birimi ile güç devresinin uyumlu bir şekilde çalışması gerekmektedir. Proteus programı dışındaki programlarda mikrodenetleyici tabanlı kontrol devresi ile güç biriminin birlikte simülasyonu gerçekleştirilememektedir. Proteus ortamında her iki işlemin birlikte gerçekleştirilebilmesi sayesinde yazılım geliştirme süreçleri hızlı bir şekilde ilerletilebilmekte ve gerçek zamanlı tasarımda karşılaşılabilecek sorunlar azaltılmaktadır (Özer vd., 2021). Mevcut çalışmalar incelendiğinde alçaltıcı tip dönüştürücü tasarımının Proteus programı aracılığı ile tasarımının yapılarak uygulamasının gerçekleştirildiği az sayıda çalışmanın olduğu görülmüştür. Çalışmalarında açık çevrim kontrollü alçaltıcı tip bir dönüştürücü devresinin simülasyonunu Proteus programı ortamında gerçekleştirmişlerdir. Giriş gerilimi 18V çıkış gerilimi 12V olarak tasarlanmış olan devrenin gerçek zamanlı uygulamasında PIC mikrodenetleyici kullanmışlardır (Ghani vd., 2019).

Dönüştürücü devrelerinde uygulanan kontrol yöntemlerine göre çalışmalar sınıflandırılmaktadır. Dönüştürücü devrelerinde kullanılan anahtarlama elemanının tetiklenme durumu üzerinden kontrol işlemleri gerçekleştirilmektedir. Bunun yansıra çıkış gerilimi veya yük akımı değişkenlerine göre farklı kontrol yöntemleri uygulanabilmektedir. Simülasyon tabanlı çalışmalarda Oransal-İntegral (PI) (Alagöz vd., 2013; Cebeci & Yaşa, 2016), Oransal-İntegral-Türev (PID) (Bozkurt, 2022), Doğrusal Karesel Regülatör (LQR) ve Kayan Kipli Kontrolör (KKK) (Özdemir, 2018) gibi kontrol yöntemleri uygulanabilmektedir. Gerçek zamanlı sistemlerde ise uygulama kolaylığı, düşük maliyeti ve pratikliği açısından gerilim ve akım kontrol yöntemleri sıklıkla tercih edilmektedir (De Araujo vd., 2020). Önerilen çalışmada giriş gerilimi 24V çıkış gerilimi 5V olacak şekilde bir alçaltıcı tip dönüştürücü tasarım gerçekleştirilmiştir. Gerçek zamanlı olarak gerçekleştirilen çalışmada PIC16F877A mikrodenetleyici tabanlı kapalı çevrim kontrollü gerilim ve akım kontrol yöntemleri kullanılmıştır. Böylelikle düşük maliyetli ve kabul edilebilir verim oranlarında çalışabilen bir düşürücü tip dönüştürücü sistemi gerçekleştirilerek literatüre katkıda bulunulmuştur.

Yapılan bu çalışmada gerilim ve akım kontrollü düşürücü tip bir dönüştürücü güç kaynağı tasarlanarak başarılı bir şekilde uygulaması gerçekleştirilmiştir. Devreyi oluşturan komponentler tasarım aşamasında matematiksel olarak hesaplanıp sınır değerleri belirlenmiştir. Gerilim ve akım kontrolünü sağlayacak olan düşürücü tip dönüştürücü devresinin geliştirilen yazılıma göre uyumlu çalışması sağlanmıştır. Simülasyon aşaması başarılı şekilde tamamlandıktan sonra devrenin gerçek zamanlı uygulaması gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan devrenin çıkışına farklı değerlerdeki omik yükler bağlanarak devre üzerinde gerçek zamanlı test işlemleri yapılmıştır. Devreden uygulanan PWM sinyalleri, çıkış yükünün gerilim ve akım bilgileri multimetre ile elde edilmiştir. Ayrıca devrenin çıkışındaki gerilim dalgalanmaları osiloskop ile ölçülmüştür. Simülasyon ve gerçek zamanlı devre uygulamasında 0.5Ω ile 4.8Ω değerleri arasında yedi farklı durum için yük testleri gerçekleştirilmiştir. Yük akımının artması ile çıkış gerilimindeki dalgalanmanın arttığı gözlemlenmiştir. Geliştirilen alçaltıcı tip devrede yük akımının artması sonucu çıkış geriliminin azaldığı tespit edilmiştir. Devreye uygulanan PWM

sinyalleri ile akım ve gerilim değerleri incelenmiştir. Gerçek zamanlı devre uygulamasında sisteme ait verim değerleri %70-%77 aralığında elde edilmiştir. Simülasyon ve gerçek zamanlı sonuçların birbirleri ile uyumlu olduğu yapılan testler sonucunda ortaya koyulmuştur.

Yazar katkısı

Author contribution

Atakan KABOĞLU: Deneysel çalışma, verilerin toplanması, makalenin hazırlanması

Tolga ÖZER: Deneysel çalışma, kaynak araştırması, makalenin hazırlanması, derleme

Etik beyanı

Declaration of ethical code

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

Çıkar çatışması beyanı

Conflicts of interest

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar

References

- Alagöz, B. B., Keleş, C., Kaygusuz, A., Kaplan, Y., & Karabiber, A. (2016). Power regulated DC/DC driver design by hierarchical control. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 24(3), 1325-1339. <https://doi.org/10.3906/elk-1312-19>
- Aslan, F. (2019). *Fotovoltaik panel destekli batarya şarj/deşarj devresi tasarımı ve simülasyonu* [Yüksek Lisans Tezi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Birkan, M. (2021). *Fotovoltaik sistemler için yüksek kazançlı DA-DA dönüştürücü tasarımı* [Yüksek Lisans Tezi, Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Bozkurt, N. (2022). *Düşürücü tip bir DA-DA dönüştürücünün sistem tanımlama yöntemiyle tasarımı ve optimizasyonu* [Yüksek Lisans Tezi, Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü].
- Cebeci, E., & Yaşa, Y. (2016). The development of DC-DC buck converter with practical design methods. *Electrical, Electronics and Biomedical Engineering (ELECO)* (pp. 691-695), Bursa.
- Çalışkan, A., Ünal, S., & Orhan, A. (2017). Buck-boost dönüştürücü tasarımı, modellenmesi ve kontrolü. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 29(2), 265-268.
- De Araujo, L. S., Alonso, A. M. D. S., & Brandao, D. I. (2020). Decentralized control of voltage-and current-controlled converters based on AC bus signaling for autonomous microgrids. *IEEE Access*, 8, 202075-202089. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3036592>
- Evran, F. (2019). Azaltan DA-DA dönüştürücüsü için kayma kip denetleyici tasarımı. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 7(1), 519-530. <https://doi.org/10.29130/dubited.438089>
- Ghani, Z. A., Kamit, K., Zeain, M. Y., Zakaria, Z., Azidin, F. A., Hadi, N. A. A., & Lago, H. (2019). Development of a Dc to Dc buck converter for photovoltaic application utilizing peripheral interface controller. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 14(7), 1317-1324.
- Hauke, B. (2015). *Basic calculation of a Buck converter's power stage*. Texas Instruments. <https://www.ti.com/lit/an/slva477b/slva477b.pdf?ts=1683646071412>
- Köse, E., Mühürücü, A., Mühürücü, G., & Aydoğan, E. (2017). Buck dönüştürücü çıkış geriliminin karınca koloni algoritması kullanılarak PI tabanlı optimal kontrolü. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32(4), 153-162. <https://doi.org/10.21605/cukurovaummfd.383217>

- Kim, S. J., Khan, Q., Talegaonkar, M., Elshazly, A., Rao, A., Griesert, N., & Hanumolu, P. K. (2014). High frequency buck converter design using time-based control techniques. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 50(4), 990-1001. <https://doi.org/10.1109/JSSC.2014.2378216>
- Liu, L., Zheng, W. X., & Ding, S. (2020). An adaptive SOSM controller design by using a sliding-mode-based filter and its application to buck converter. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 67(7), 2409-2418. <https://doi.org/10.1109/TCSI.2020.2973254>
- Mamur, A. (2012). *Fpga denetimli düşürücü DA-DA dönüştürücünün tasarımı ve gerçekleştirilmesi*. [Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Özdemir, Ö. (2018). *Sürekli akım modunda çalışan alçaltıcı tip DA-DA dönüştürücülerin gerilim kontrolü* [Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Özer, A., & Kelebekler, E. (2021). DA/DA alçaltıcı tip dönüştürücü devresinin TS-EN 61000-3-2 standardına uyumlu hale getirilmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (28), 653-659. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1009998>
- Özer, T., Kivrak, S., Oğuz, Y., Kelek, M. M., & Karaca, A. (2021). DsPic33fj32mc204 mikroişlemci tabanlı hall sensörlü fırçasız doğru akım motor sürücüsü tasarımı ve Proteus simülasyon uygulaması. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 21(4), 820-828. <https://doi.org/10.35414/akufemubid.889532>
- Salihmuhsin, M., & Babaoğlu, S. (2016). A Buck converter design with digitally implemented P controller. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 19(3), 87-90.
- Sevim, D., & Bozkurt, N. (2021). DA-DA düşürücü dönüştürücünün sistem tanımlaması ve kontrolü. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (31), 881-889. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1019650>
- Ürgün, S., Erfidan, T., & Çoruh, N. *DA-DA Buck dönüştürücü tasarımı ve gerçekleştirilmesi*. EMO. https://www.emo.org.tr/ekler/e7b431c86a06d88_ek.pdf
- Yasko, M. A. (2018). *Fotovoltaik sistemlerde düşürücü tip DA-DA dönüştürücülü maksimum güç noktası izleyicisinin analizi, tasarımı ve gerçekleştirilmesi* [Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Yaylacı, E. K., Yılmaz, A. E., & Özdeş, H. N. (2022). Kızıl tilki optimizasyon algoritması ile DA-DA alçaltıcı tip dönüştürücü kontrolör katsayılarının optimizasyonu. *Mühendislik Bilimleri ve Araştırmaları Dergisi*, 4(2), 129-140. <https://doi.org/10.46387/bjesr.1111592>