



ÇOK FAZLI MİKRODENETLEYİCİ TABANLI SENKRON DÜŞÜRÜCÜ DÖNÜŞTÜRÜCÜDE ÇALIŞMA MODLARININ VERİME ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Barış YENER, Nihan ALTINTAŞ*

Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

Anahtar Kelimeler

Düşürücü Dönüştürücü,
Senkron Dönüştürücü,
Mikrodenetleyici,
Çok Fazlı.

Öz

Son zamanlarda hızla artan enerji tüketimi ve enerji kaynaklarının azalması nedeniyle enerjiyi verimli kullanmak önemli hale gelmiştir. Günümüzde arabalar, cep telefonları, ısıtıcı üniteler, akü şarj cihazları, LED sürücüler gibi elektronik cihazların çoğunun içinde güç dönüştürücüleri bulunmaktadır. Bu çalışmada, çok fazlı senkron düşürücü dönüştürücü devresinin verimini artırmak için bir çalışma yapılmıştır. Devrede birbirine eş dört adet senkron düşürücü dönüştürücü kullanılmıştır. Devrenin kontrolü mikrodenetleyici yardımı ile yapılmıştır. Sabit ve değişken olmak üzere iki çalışma modu için verim değerleri incelenmiştir. Devrede aynı zamanda aktif faz sayısı, anahtarlama frekansı ve yük akımı parametrelerinin değişmesi durumunda verim değerleri tespit edilmiştir. Alınan ölçümlerin değerleri ve çalışma noktaları incelendikten ve her bir yük durumu için optimum çalışma koşulu belirlendikten sonra, kontrol algoritmasına eklenerek değişken yük durumunda aktif faz sayısı ve çalışılacak anahtarlama frekansına karar verilmiştir. Böylece devrede ilave eleman kullanmadan ve devre maliyetini arttırmadan devrenin tüm yük koşulları altında maksimum verimde çalışması sağlanmıştır.

AN INVESTIGATION OF THE EFFECT OF OPERATION MODES ON EFFICIENCY IN MULTIPHASE MICROCONTROLLER BASED SYNCHRONOUS BUCK CONVERTER

Keywords

Buck Converter,
Synchronous Converter,
Microcontroller,
Multi-phase.

Abstract

Recently, it has become important to use energy efficiently due to the rapidly increasing energy consumption and the decrease in energy resources. Today, most of the electronic devices such as cars, mobile phones, heater units, battery chargers, LED drivers have power converters inside. In this work, a study has been carried out to increase the efficiency of the multi-phase synchronous buck converter circuit. Four identical synchronous buck converters are used in the circuit. The control of the circuit is made with the help of microcontroller. Efficiency values were examined for two operating modes, fixed and variable. At the same time, efficiency values were determined for the change of active phase number, switching frequency and load current parameters of the circuit. After examining the values and operating points of the measurements taken and determining the optimum operating condition for each load situation, the number of active phases in variable load condition and the switching frequency to be operated are decided by adding them to the control algorithm. Thus, it is ensured that the circuit operates at maximum efficiency under all load conditions without using additional elements in the circuit and without increasing the circuit cost.

Alıntı / Cite

Yener, B., Altıntaş, N., (2023). Çok Fazlı Mikrodenetleyici Tabanlı Senkron Düşürücü Dönüştürücüde Çalışma Modlarının Verime Etkisinin İncelenmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 11(1), 254-263.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

B. Yener, 0000-0002-5783-0377
N. Altıntaş, 0000-0002-6567-7675

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	21.07.2022
Revizyon Tarihi / Revision Date	14.10.2022
Kabul Tarihi / Accepted Date	07.11.2022
Yayın Tarihi / Published Date	27.03.2023

*İlgili yazar / Corresponding author: naltin@yildiz.edu.tr, +90-212-383-5845

AN INVESTIGATION OF THE EFFECT OF OPERATION MODES ON EFFICIENCY IN MULTIPHASE MICROCONTROLLER BASED SYNCHRONOUS BUCK CONVERTER

Bariş YENER, Nihan ALTINTAŞ†

Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

Highlights

- In the study, an algorithm was developed to be used in a multi-phase synchronous buck converter.
- The proposed algorithm increases the efficiency of the system in every operating mode.
- The algorithm can be easily adapted to more than four phases.
- The efficiency obtained with the proposed method is over 90% in a wide operating range.

Graphical Abstract

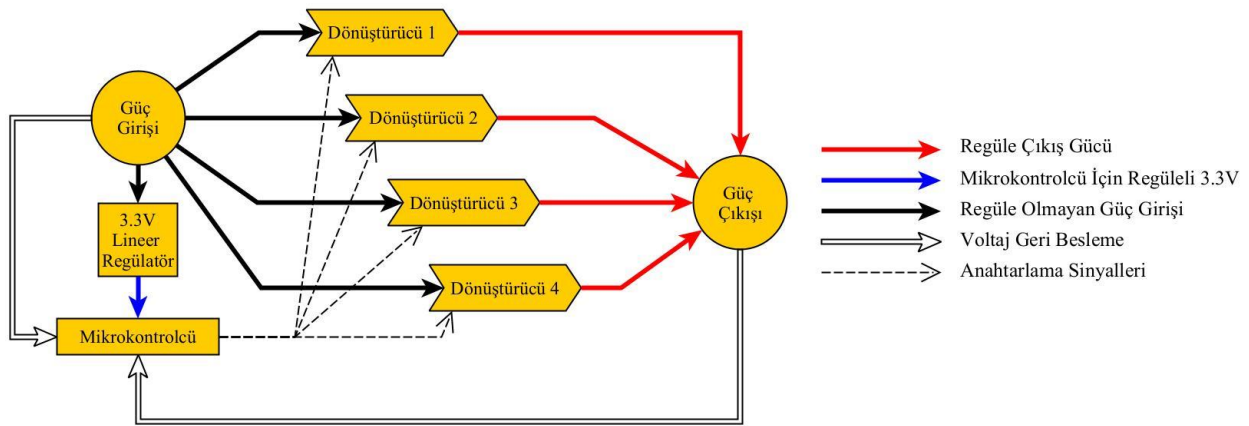


Figure. Control and Power Stage Block Diagram

Purpose and Scope

The main purpose of this study is to increase the efficiency of the multi-phase synchronous buck converter circuit without control complexity and without using extra elements.

Design/methodology/approach

In order to examine the multi-phase synchronous buck converter circuit in terms of efficiency, 4 identical synchronous buck converter circuits are connected in parallel. A microcontroller controls the circuit, and algorithms have been developed to provide power conversion. Efficiency measurements are made by operating the circuit in constant operation and variable operation mode.

Findings

The multi-phase synchronous buck converter circuit has been operated efficiently in all operating conditions without using additional elements or increasing the circuit cost by optimizing the switching frequency and active phase number with the developed algorithm.

Originality

In general, studies on increasing the efficiency of multi-phase buck converters are used additional elements or complex controllers in the circuit. In this study, efficient operation is ensured in all operating conditions thanks to the algorithm developed to dynamically adjust the converter switching frequency and the number of active converter circuits. The study aims to help researchers and engineers working to ensure efficient operation in power converters.

† Corresponding author: naltin@yildiz.edu.tr, +90-212-383-5845

1. Giriş (Introduction)

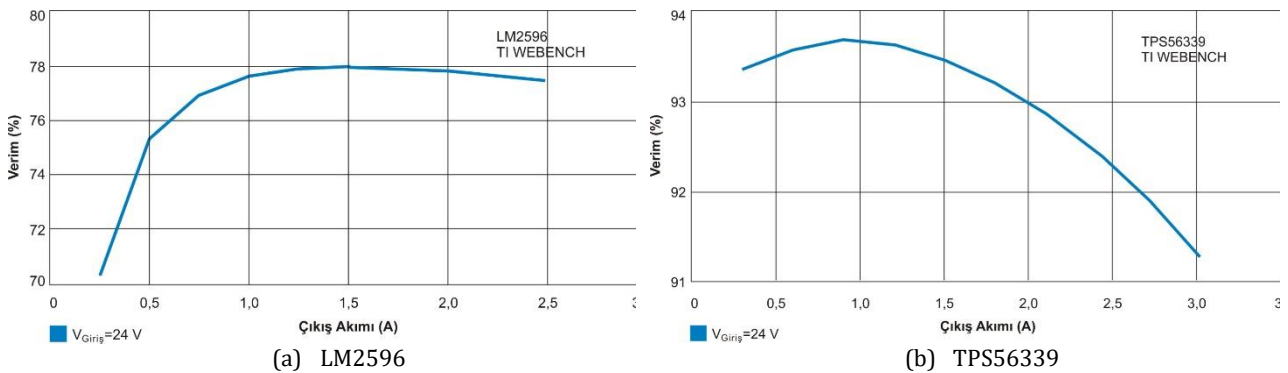
Enerji, sanayinin olduğu kadar halkın günlük yaşantısının da önemli girdilerinden biridir. Enerjiye olan talep sürekli olarak artarken, enerji kaynaklarının da hızlı bir şekilde tükenmesi enerjinin verimli kullanılmasını zaruri hale getirmiştir (World Energy & Climate Statistics, World Consumption Statistics, Yearbook 2022). Enerji verimi yüksek cihazlar, aynı birim iş yükünü yerine getirmek için enerji verimi düşük cihazlara göre daha az enerji kullanır. Bu nedenle hızla artan enerji talebini yavaşlatmak için kullandığımız cihazların enerji veriminin artırılması büyük önem taşımaktadır.

Günlük hayatımızda kullandığımız tüm elektronik cihazlar alternatif akım (AA) veya doğru akım (DA) elektrik enerjisi ile çalışır. Şebekeden alınan enerji, güç dönüştürücüleri sayesinde farklı seviyelerdeki regüle edilmiş gerilimlere dönüştürülür. Bu dönüştürücülerin verimi cihazın verimini doğrudan etkiler (Tutaev vd., 2019). Doğru akım dönüştürücüleri, girişindeki gerilimi çıkışında yükün talep ettiği gerilim değerine ayarlayan devrelerdir. Bu dönüştürme işlemi esnasında girişten çekilen enerji, çıkışa aktarılan enerjiden fazladır. Giriş ve çıkış arasındaki enerji farkı devre elemanları üzerinde ısı enerjisi olarak ortaya çıkar. Kayıp olarak açığa çıkan ısı enerjisinin miktarı devrenin verimliliğini belirler. Düşük verimli cihazlar hem daha fazla enerji tüketir hem de daha fazla ısınır.

Literatürde birçok DA dönüştürücü topolojisi bulunmaktadır. Düşürücü Dönüştürücü (DD), temel DA dönüştürücü topolojilerinden biridir. Elde edilen çıkış gerilimi giriş geriliminden küçük olduğundan bu dönüştürücüye DD denir. Basit bir yapıya sahip olan dönüştürücü tam kontrollü yarı iletken bir güç elemanı, bir diyot ve bir endüktanstan (bobin) oluşur. Dönüştürücünün verimi kullanılan devre elemanlarına bağlı olarak değişir. Nominal çalışma durumu dikkate alınarak tasarlanan dönüştürücünün verimi tüm çalışma koşullarında aynı değildir.

DD'nin bir türü olan Senkron Düşürücü Dönüştürücüler (SDD), günümüzde endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. SDD'nin kullanıldığı uygulamalara örnek olarak pil şarj devreleri, bilgisayarlar, telefonlar, televizyonlar verilebilir. SDD'de DD'den farklı olarak diyot yerine bir anahtarlama elemanı kullanılır. Bu devre topolojisini entegre bobinli, entegre anahtarlı veya sadece kontrolör olarak bulmak mümkündür. Ayrıca mikroşlemci kontrollü olan türleri de mevcuttur.

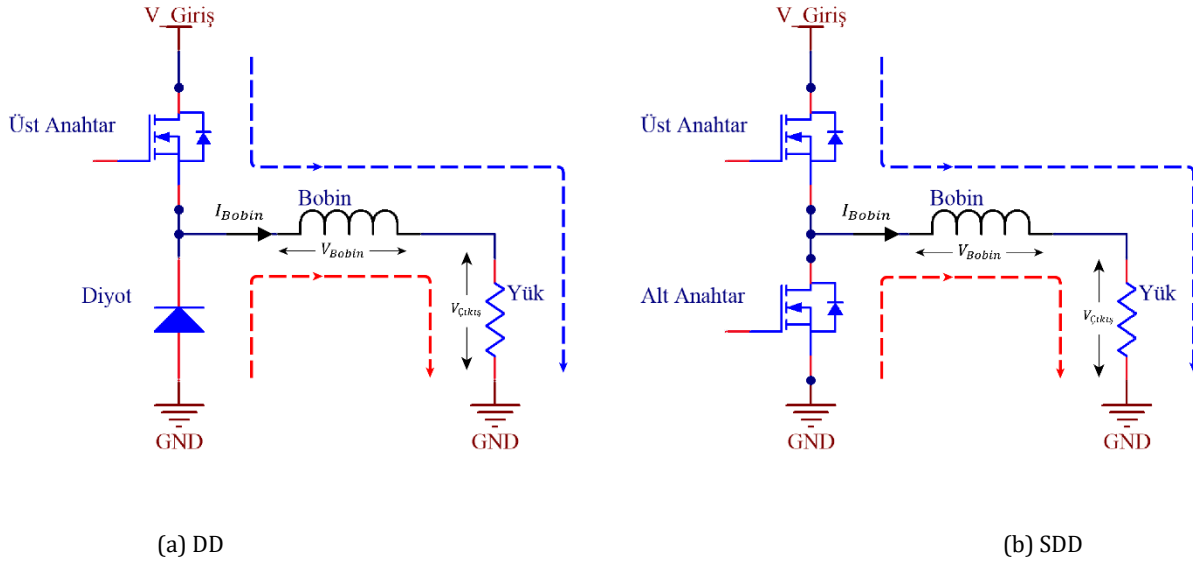
Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, SDD'nin veriminin DD'ye göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Verimdeki artış; diyot yerine kullanılan yarı iletken anahtarın, iletim gerilim düşümü ve bunun sonucu olarak iletim güç kaybının daha az olmasından kaynaklanmaktadır (Yıldız vd., 2016; Haque vd., 2020; Haque vd., 2021). Ayrıca diyotun ters toparlanması esnasında meydana gelen güç kayıplarının oluşmaması da verimin artışında etkilidir. SDD'nin veriminin DD'den daha iyi olduğunu doğrulamak amacıyla TI WEBENCH programında 24V giriş geriliminden 5V çıkış gerilimi elde etmek için, DD (LM2596) (Texas Instruments, 2021) ve SDD (TPS56339) (Texas Instruments, 2019) farklı çıkış akımları altında çalıştırılmıştır. Dönüştürücülerin çıkış akımına bağlı verim eğrileri Şekil 1'de verilmiştir. Verim eğrilerinden de görüleceği gibi tüm çıkış akımlarında SDD'nin verimi DD'den daha yüksek çıkmıştır.



Şekil 1. Verim eğrileri (Efficiency curves)

Endüktans akımının sürekli olması ve kararlı çalışma durumunda, DD ve SDD'nin bir anahtarlama periyodunda iki çalışma aralığı oluşur. Bu aralıklar aynı zamanda üst anahtarın iletim (T_{iletim}) ve kesimde (T_{kesim}) olduğu süreler olarak da tanımlanır. Birinci aralıkta kontrol sinyali uygulanmış olan üst anahtar iletimdedir ve giriş gerilim kaynağı endüktansa enerji aktarır ve çıkışı besler. Bu aralıkta endüktans akımı artar. Üst anahtarın kontrol sinyalinin kesildiği ikinci aralıkta anahtar kesimdedir ve giriş gerilim kaynağı ile endüktansın bağlantısı kopar. Bu aralıkta endüktans çıkışı beslediği için endüktans akımı düşer. DD ile SDD arasındaki fark bu aralıkta meydana gelir. DD'de endüktans akımını çıkışa diyot iletirirken, SDD'de alt anahtar iletime girip endüktans akımını çıkışa

aktarır. Dönüştürücülerin çalışma aralıklarına ait akım yolları Şekil 2'de verilen devre şemalarında gösterilmiştir. Burada mavi ve kırmızı çizgiler sırasıyla üst anahtarın iletim ve kesim aralıklarında oluşan akım yollarını göstermektedir. SDD'ye ait iletim ve kesim aralıklarında bobin uçlarındaki gerilimin ifadesi Formül (1) ve (2)'de verilmiştir. Burada $V_{Giriş}$, $V_{Çıkış}$, V_{Bobin} sırasıyla giriş, çıkış ve bobin gerilimlerini, I_{Bobin} bobin akımını, $r_{dsiletim}$ üst ve alt anahtar olarak kullanılan MOSFET'in iletim direncini, R_{Bobin} bobinin eşdeğer seri direncini ve $R_{yük}$ yük direncini göstermektedir. Kararlı çalışma durumunda bir anahtarlama periyodu içerisinde bobin uçlarındaki gerilimin ortalaması sıfır olması gerektiğinden Formül (1) ve (2) eşitlenerek düzenlendiğinde Formül (3)'de verilen çıkış geriliminin giriş gerilimine bağlı ifadesi elde edilir.



Şekil 2. Dönüştürücülerin çalışma aralıklarına ait akım yolları
(Current paths of operating intervals of converters)

$$V_{Bobin} = V_{Giriş} - V_{Çıkış} - I_{Bobin}(r_{dsiletim} + R_{Bobin}) \quad (1)$$

$$V_{Bobin} = -V_{Çıkış} - I_{Bobin}(r_{dsiletim} + R_{Bobin}) \quad (2)$$

$$V_{Çıkış} = \frac{R_{Yük}}{(R_{Yük} + r_{dsiletim} + R_{Bobin})} \frac{T_{iletim}}{(T_{iletim} + T_{Kesim})} V_{Giriş} \quad (3)$$

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde SDD devrelerinin verimi artırmak amacıyla devre topolojisine ilave eleman eklendiği ya da karmaşık kontrolcülerin kullanıldığı görülmektedir. İlave aktif ve pasif elemanların kullanıldığı yumuşak anahtarlama tekniklerinden sıfır gerilimde anahtarlama (Zero Voltage Switching - ZVS) ve sıfır gerilimde geçiş (Zero Voltage Transition - ZVT) ile anahtarlama kayıpları azaltılarak devre verimi artırılmıştır (Talebian vd., 2021; ; Shen vd., 2020). Yeni bir frekans modülasyonu tekniğinin önerildiği (Chang vd., 2019) çalışmada, özellikle düşük çıkış akımlarında verimin artırılması sağlanmıştır. Gallium Nitride (GaN) ve Silicon carbide (SiC) yarı iletken malzemeleri ile üretilen yeni nesil anahtarlar kullanılarak devre veriminin etkisi incelenmiştir (Huang vd., 2015; Wentzel vd., 2020; Stephens, 2021). Tasarım sorunlarını, sınırlamalarını iyileştirmek ve devre performansını arttırmak amacıyla mikrodeneleyici ve alanda programlanabilir kapı dizileri (Field-Programmable Gate Array - FPGA) kullanılarak kontrol sinyalleri üretilmiştir (Li, 2003; Koutroulis vd., 2001; Erfidan ve Coruh, 2009; Kumar ve Thakura, 2017; Kroics, 2013). Ayrıca fotovoltajik paneller için mikrodeneleyici tabanlı maksimum güç noktası izleme uygulamaları da vardır (Koutroulis vd., 2001; Koran vd., 2013; Viswanatha 2018). 8051 tabanlı bir mikroişlemci ile tek fazlı evirici kontrolcü uygulaması, hem düşük maliyet ve temel seviyede bir mikroişlemci ile güç kontrol uygulamalarının gerçekleştirilebileceği sunulmuştur (Prasad vd., 2009).

Düşük çıkış geriliminde yüksek akımlar elde etmek için Çok Fazlı SDD devreleri kullanılır. Çok fazlı SDD'lerin aralıklı çalışması, akım ve gerilim dalgalanmalarını azaltmaktadır. Fakat dönüştürücünün kontrolü, aralıklı ve senkron çalışması nedeniyle daha karmaşıktır (Abe vd., 2007; Varghese vd., 2021; Piispanen, 2019; Morais ve Martins, 2022; Shen vd., 2020; Kim vd., 2009). Buna ek olarak yeniden programlanabilir mikroişlemciler ve bu durumun getirdiği esneklik ile karmaşık devrelerin kontrolünü kolaylaştırabilir (Sanchez vd., 2009). Giriş ve çıkış kondansatör değerleri daha düşük seçilebilir. Bu sayede hızlı geçiş cevabı elde edilebilir (Parisi, 2021). Dört fazlı

SDD devresinde bobin olarak simetrik kuplajlı endüktansın kullanılması durumunda verimin %2-%6 arttığı ifade edilmiştir (Nagaraja vd., 2010).

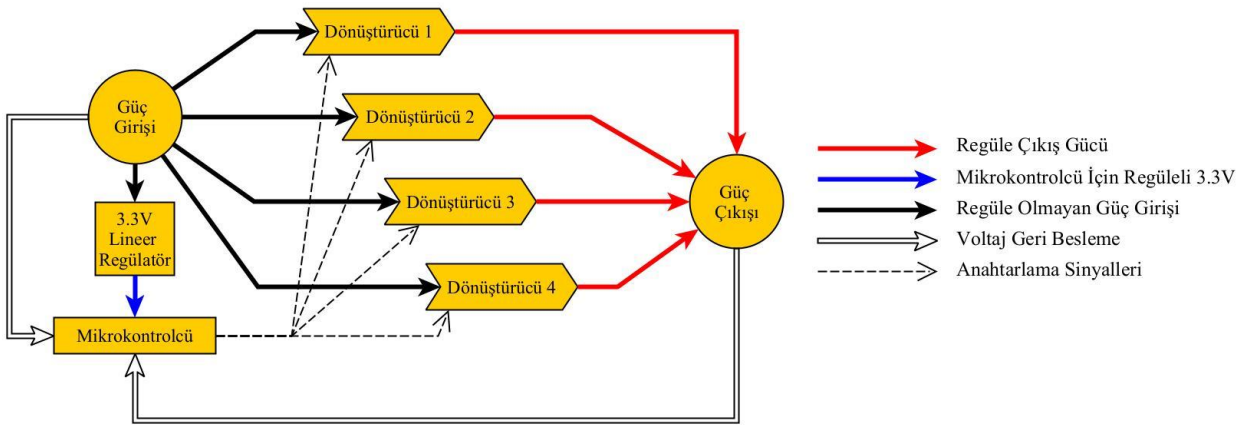
Bu çalışmada, çok fazlı SDD'nin farklı çalışma modları için verim değerleri elde edildi. Güç dönüştürücüsü farklı güç noktaları için ayrı ayrı optimizasyonu yapıldı. Dönüştürücü anahtarlama frekansı ve aktif dönüştürücü devre sayısı, güç dönüştürücünün çıkışındaki güce göre mikrodenetleyicideki algoritma ile dinamik olarak en verimli şekilde ayarlandı. Böylece farklı çalışma modları için devrenin genel veriminin artırılması sağlandı.

2. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

Çok fazlı SDD devresini verim açısından incelemek üzere 4 adet özdeş özelliklerde SDD paralel bağlanmıştır. Devrenin kontrolünde mikroişlemci kullanılmıştır ve güç dönüşümünü sağlayan iki algoritma yazılmıştır. Devre sabit çalışma ve değişken çalışma modunda çalıştırılarak verim ölçümleri yapılmıştır. Bu modlara ek olarak çıkış gerilimini sabit tutmak için oransal integral (proportional integral-PI) kontrolör kullanılmıştır. PI parametreleri her iki algoritma için de aynıdır.

Sabit çalışma modunda, sabit bir anahtarlama frekansı ile aktif dönüştürücülerin sayısını değiştirmeden çıkıştaki gerilim sabit tutulur. Bu çalışma modundaki verim ölçümleri için, belirlenen frekanslarda farklı yük koşulları ile yük testleri yapılmıştır. Her çalışma koşulu için en verimli çalışma noktası tespit edilmiştir.

Değişken çalışma modunda, çıkıştaki yüke bağlı olarak devredeki aktif dönüştürücü sayısı ve anahtarlama frekansı aktif olarak değişmektedir. Bu modun kullanılabilmesi için öncelikle sabit çalışma modunda belirlenen maksimum çalışma noktaları algoritmaya bir tablo ile eklenir. Algoritma, çıkıştaki yüke bağlı olarak dönüştürücünün en verimli çalışacağı anahtarlama frekansına dinamik olarak geçer. Aynı zamanda gerekli sayıda dönüştürücüyü devreye alır veya devreden çıkarır. Dönüştürücünün kontrol ve güç katı blok şeması Şekil 3'te verilmiştir.



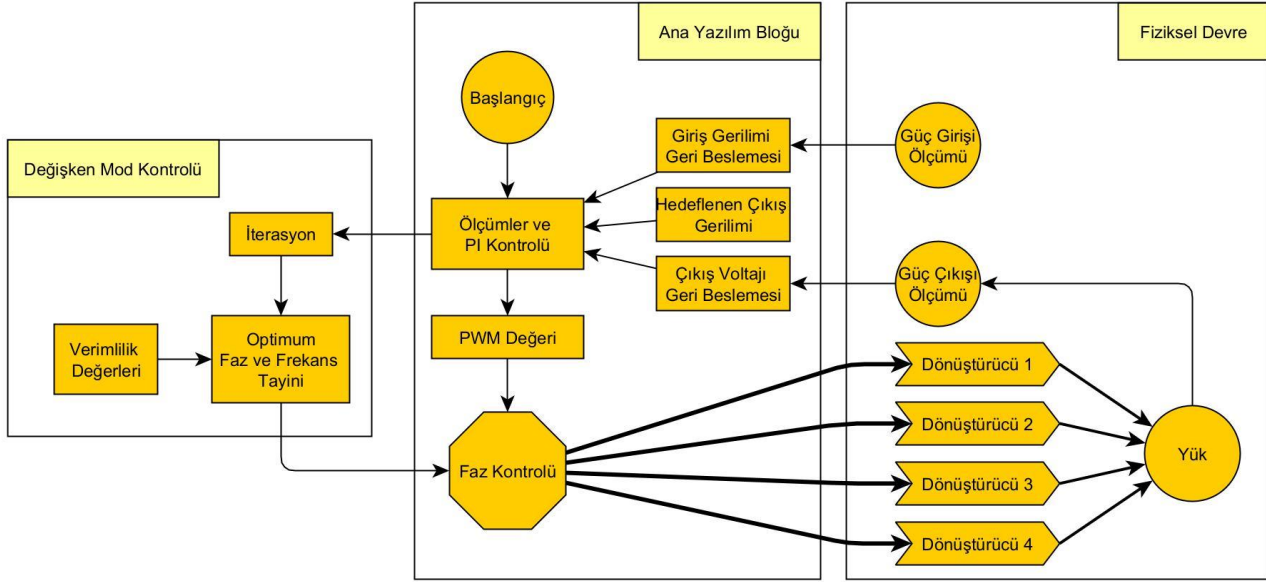
Şekil 3. Kontrol ve güç katı blok şeması (Control and power stage block diagram)

Devre ölçümlerinde hata payını azaltmak için ölçüm noktaları, kablo uzunlukları ve giriş gerilimi sabit tutulmuştur. Tüm ölçümler, devre kararlı durum sıcaklığına ulaştıktan sonra yapılmıştır. Aktif dönüştürücüler devredeki en kısa akım yoluna sahip olan dönüştürücülerdir. Mikroişlemci içinde çalışan PI denetleyici, her iki çalışma modunda aynı olmalıdır. Bu yüzden algoritma, PI denetleyicisinin aktif dönüştürücü sayısı ve anahtarlama frekansından etkilemeyecek şekilde hazırlanmıştır. Verim (η) değerleri, Formül (4)'te verilen denklemin kullanıldığı bilgisayar programı yardımıyla hesaplanmıştır. Buradaki akım ve gerilim değerleri dönüştürücülerden ölçülmüştür.

$$\eta = (V_{\text{Çıkış}} \cdot I_{\text{Çıkış}}) / (V_{\text{Giriş}} \cdot I_{\text{Giriş}}) \quad (4)$$

Önerilen algoritmaya ait yazılım akış şeması Şekil 4'te verilmiştir. Ana yazılım bloğu ile çıkıştaki gerilimin sabit tutulması sağlanır. Ayrıca, dönüştürücünün güvenli şekilde çalışmasını, kısa devre kontrolünü, maksimum bobin akım kontrolünü, girişteki ve çıkıştaki gerilim kontrollerini gerçekleştirir. Ana yazılım bloğu aktif çalışan fazları ve frekanslarını değiştirmez. Yazılım sabit çalışma modunda çalışırken değişken mod kontrolü devrede değildir. Sabit çalışma modu, devrenin her yük koşulu için verim değerlerini ölçmede kullanılır. Bu modda alınan ölçümler bir tabloya kaydedilir. Değişken çalışma modu devreye alındığında, ana yazılım bloğundaki hesaplanan ölçümler, verim tablosundaki değeri ya da en yakın değerdeki çalışma koşulları okunarak, çalışacak faz sayısı ile birlikte dönüştürücülerin çalışma frekansı belirlenir. Elde edilen sonuçlar ana yazılım bloğundaki faz kontrolü algoritmasına yönlendirilir. Bu algoritma dönüştürücülerin çalışmasını belirler ve sinyal genişlik modülasyonu

(Pulse Width Modulation - PWM) kontrol sinyallerini üretir. Uygulama devresinin giriş ve çıkışındaki gerilimler, mikroişlemcinin analog-dijital dönüştürücü (Analog to Digital Converter - ADC) bloğu yardımıyla ölçülür. Bu ölçümler ve uygulanan PWM sinyalleri doğrultusunda dönüştürücüdeki bobin akımları hesaplanır.



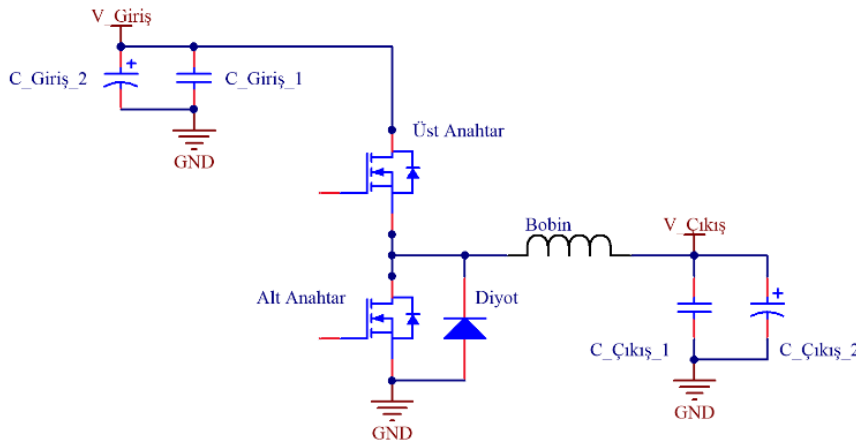
Şekil 4. Yazılım akış şeması (Software flow chart)

3. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

Önerilen algoritmanın çok fazlı SDD'nin verimi üzerindeki etkisini göstermek üzere Şekil 3'te blok şeması verilen dönüştürücünün uygulama devresi gerçekleştirilmiştir. Bir faza ait SDD devre şeması Şekil 5'te verilmiştir. Devre iki yarı iletken güç anahtarı, bir endüktans ile giriş ve çıkışta bulunan elektrolitik ve seramik kondansatörlerden oluşmaktadır. Tasarımı yapılan SDD'ye ait parametreler Tablo 1'de verilmiştir. Deneysel devrede üst ve alt anahtarlama elemanı olarak AON7318 kullanılmıştır.

Devrenin çıkışındaki gerilim dalgalanmasını ve girişindeki akım dalgalanmasını azaltmak amacıyla her bir dönüştürücüye ait kontrol sinyali bir önceki dönüştürücünün kontrol sinyaline göre 90 derece faz farkı ile uygulanmıştır. Giriş ve çıkış gerilim değerleri mikrodenetleyici ile okunarak kapalı çevrim kontrol döngüsü ve ilgili algoritmada kullanılır. Mikrodenetleyici, tepe ve ortalama endüktans akımını hesaplamak için PWM sinyallerini üreten bir algoritma çalıştırır. Sistemin PWM ve ADC gereksinimlerini karşılamak için mikrodenetleyici olarak MKV44F64VLF7 kullanılmıştır.

Anahtarların sürme devrelerinin beslemesi ve gürültüden etkilenmemesi için devrenin girişinde filtreleme yapılmıştır. Mikrodenetleyici besleme gerilimi, giriş gerilim kaynağına bağlı 3.3V düşük çıkışlı regülatör ile sağlanmıştır. ADC ölçümlerinde kullanılan referans gerilimi de bu besleme hattından alınmıştır.

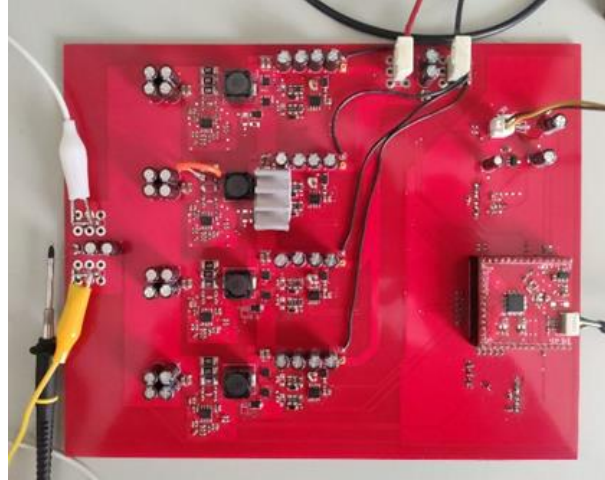
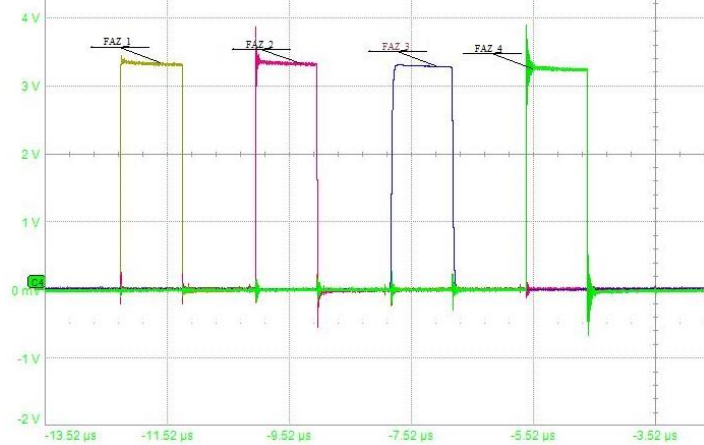


Şekil 5. SDD'nin bir fazına ait devre şeması (Circuit diagram of one phase of SDD)

Tablo 1. SDD Devresine ait tasarım parametreleri (Design parameters of SDD circuit)

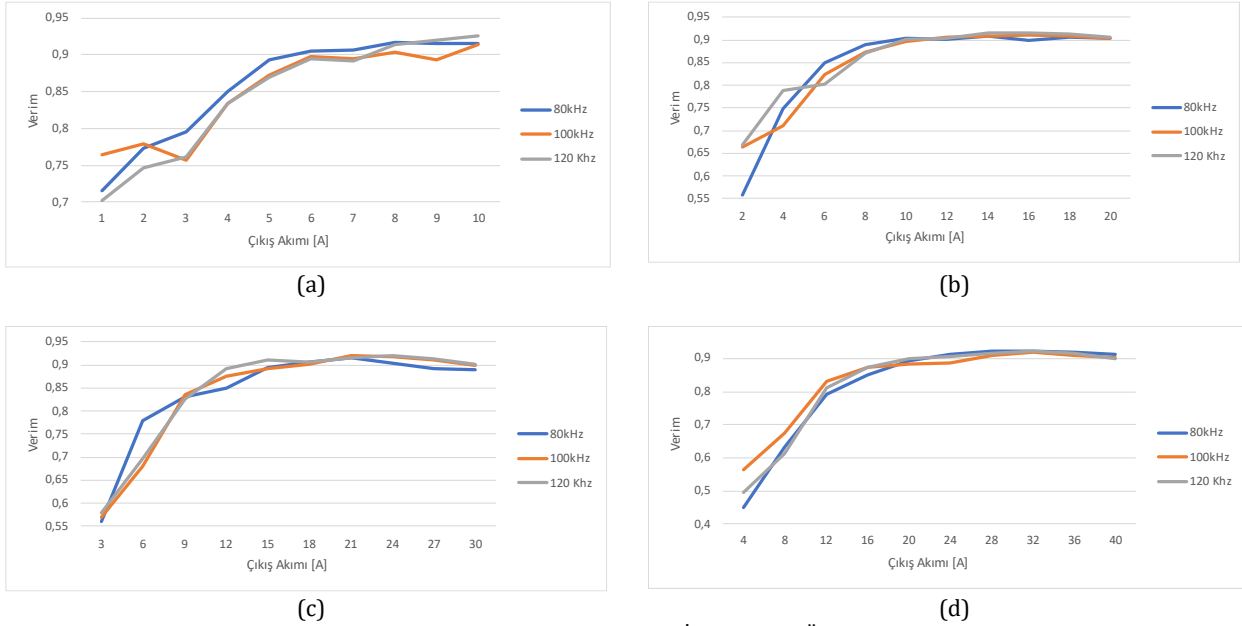
Parametre	Kısaltma	Değer
Giriş Gerilimi	$V_{Giriş}$	12 V
Çıkış Gerilimi	$V_{Çıkış}$	0-5 V
Nominal Yük Akımı (Dönüştürücü Başına)	$I_{Yük}$	10 A
Toplam Nominal Yük Akımı	$I_{Top.Yük}$	40 A
MOSFET İletim Direnci	$R_{dS_{iletim}}$	1.95 m Ω
Bobin Direnci	R_L	20 m Ω
Endüktans	L	4.7 μ H
Bobin Akımı Dalgalanması	ΔI_L	8 A
Çıkış Gerilimi Dalgalanması	$\Delta V_{çıkış}$	%1
Çıkış Kondansatörü	$C_{Çıkış}$	500 μ F
Anahtarlama Frekansı	f_s	80-100-120 kHz

Tasarım parametrelerine uygun olarak baskı devre kart (Printed Circuit Board – PCB) tasarımı gerçekleştirilmiştir. Şekil 6'dan da görüldüğü gibi PCB birbirine paralel özdeş dört SDD devresi ve bu dönüştürücüleri kontrol eden bir mikrodenetleyiciden oluşmaktadır. Mikrodenetleyici, paralel bağlı devrelerin giriş ve çıkışlarından aldığı gerilim geri besleme değerlerine göre PWM kontrol sinyallerini üretir. Bu dönüştürücülerin kontrolünde farklı frekanslarda çalışabilen ve birbirinden bağımsız olarak kontrol edilebilen 8 adet PWM sinyali kullanılmaktadır. İlgili fazlar için üretilen üst ve alt anahtar kontrol sinyalleri ilgili anahtarlara uygulanır. Üst anahtar kontrol sinyallerine ait dalga şekilleri Şekil 7'de görülmektedir. Burada, üst elemanların kontrol sinyalleri arasında 90 derece faz farkı bulunmaktadır.

**Şekil 6.** Çok fazlı SDD devresinin PCB kartı (PCB board of multi-phase SDD circuit)**Şekil 7.** Üst anahtarların kontrol sinyalleri (High side control signals)

SDD devresi ilk olarak sabit çalışma modunda çalıştırılarak verim değerleri alınmıştır. Dönüştürücü bir fazlı, iki fazlı, üç fazlı ve dört fazlı olarak üç farklı anahtarlama frekansında (80-100-120kHz) çalıştırılmıştır. Devre çıkışında yük olarak direnç yükü kullanılmıştır. Farklı çıkış akım değerleri için ölçümler alınmıştır. Tek bir fazın tasarım akım limiti 10A olarak belirlenmiştir. Her bir fazdaki dönüştürücü akım limit değerine ulaşana kadar tüm çalışma durumları için işlem tekrar edilmiştir. Ölçümlerde Teledyne LeCroy dijital osiloskop ve Fluke true rms

dijital multimetre kullanılmıştır. Alınan ölçümler kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen verim eğrileri çıkış akımına bağlı olarak Şekil 8 (a-d)'de verilmiştir. Nominal çalışma akımı civarında devre veriminin düşük akım değerlerine göre daha yüksek olduğu görülmektedir.



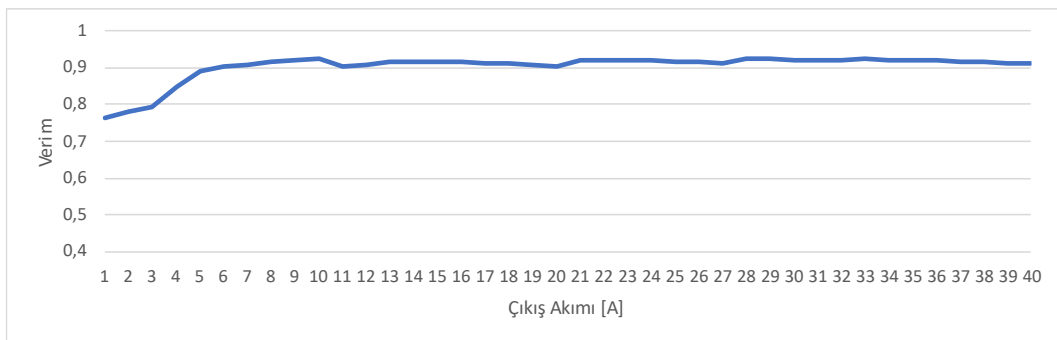
Şekil 8. Çıkış Akımına bağlı verim, (a) Tek fazlı (b) İki fazlı, (c) Üç fazlı, (d) Dört fazlı çalışma (Efficiency versus output current, (a) Single-phase (b) Two-phase, (c) Three-phase, (d) Four-phase operation)

Sabit çalışma modunda alınan ölçüm değerleri incelenerek, her bir çıkış akım değeri için optimum çalışma koşulu belirlenir. Böylece bütün çalışma akımı değerlerinde maksimum verimi elde etmek için kullanılacak dönüştürücü sayısı ve dönüştürücülerin çalışma frekansı belirlenmiş olur. Her bir çalışma koşuluna ait veriler Tablo 2'de verilmiştir. Oluşturulan tablo algoritmaya eklenerek değişken çalışma modunda dönüştürücünün kontrolü sağlanmıştır. Dönüştürücü tasarım akım limit değerine ulaşana kadar yük testleri tekrarlanarak ölçümler alınmıştır. Değişken çalışma modunda alınan ölçümler kullanılarak verim değerleri hesaplanmış ve çıkış akımına bağlı olarak verim eğrisi Şekil 9'da verilmiştir. Dönüştürücünün geniş çalışma akımı aralığında %90'nın üzerinde verimle çalıştığı görülmektedir.

Tablo 2. Çıkış akımına bağlı maksimum verimde çalışma koşulları (Operating conditions at maximum efficiency based on output current)

Faz sayısı	Çıkış Akımı (A)						
	1-2	3-8	9-10	11-12	13-20	21-27	28-40
1	1-2	3-8	9-10				
2				11-12	13-20		
3						21-27	
4							28-40

Anahtarlama Frekansı	80 kHz	120 kHz	100 kHz



Şekil 9. Değişken çalışma modu ile kontrol edilen SDD devresinin çıkış akımına bağlı verim eğrisi (Efficiency curve depending on output current of SDD circuit controlled by variable mode of operation)

Değişken çalışma moduna ait verim değerlerinden sabit çalışma moduna ait verim değerleri çıkartılarak elde edilen fark değerleri Tablo 3'te verilmiştir. Bu değerler dört farklı aktif faz durumu ve üç farklı çalışma frekansı için hesaplanmıştır. Geliştirilen algoritma sayesinde dönüştürücünün sabit çalışma modundan daha verimli

çalışmayı sağladığı tablodan da görülmektedir. Farkın sıfır olduğu çıkış akımı değerlerinde, sabit çalışma modunda tespit edilen noktalarda çalışıldığını göstermektedir. Düşük çıkış akımlarında aktif faz sayısı azken verimin arttığı görülmektedir. Yüksek çıkış akımlarında ise akımın tüm dönüştürücülere dağıtılması ve anahtarlama frekansının düşürülmesi ile verimin arttığı görülmektedir. Çok fazlı SDD devrelerinde değişken çalışma modunun kullanılması durumunda oluşan en düşük verim değeri sabit çalışma moduna ait verim değeri ile aynıdır. Geliştirilen algoritma ile anahtarlama frekansı ve aktif faz sayısı optimize edilerek çok fazlı SDD devrelerinin tüm çalışma koşullarında maksimum verimde çalışması sağlanmıştır.

Tablo 3. Değişken çalışma modu için verim farkı (Efficiency difference for variable operating mode)

AKIM (A)	1 FAZ			AKIM (A)	2 FAZ		
	80kHz	100kHz	120kHz		80kHz	100kHz	120kHz
1	4,79	0,00	6,24	2	22,07	11,61	11,16
2	0,62	0,00	3,24	4	10,10	13,89	6,18
3	0,00	3,77	3,38	6	5,49	8,03	10,26
4	0,00	1,51	1,64	8	2,74	4,38	4,59
5	0,00	2,03	2,39	10	2,16	2,83	2,28
6	0,00	0,70	1,00	12	0,56	0,00	0,23
7	0,00	1,26	1,47	14	0,81	0,68	0,00
8	0,00	1,25	0,22	16	1,75	0,49	0,00
9	0,45	2,72	0,00	18	0,66	0,37	0,00
10	0,96	1,09	0,00	20	0,13	0,18	0,00

AKIM (A)	3 FAZ			AKIM (A)	4 FAZ		
	80kHz	100kHz	120kHz		80kHz	100kHz	120kHz
3	23,47	22,47	21,47	4	39,94	28,44	35,44
6	12,46	22,46	20,66	8	28,31	24,11	30,41
9	9,02	8,52	9,42	12	11,31	7,41	9,41
12	5,61	3,11	1,31	16	6,45	4,35	4,25
15	2,00	2,30	0,50	20	1,36	2,36	0,46
18	0,65	1,25	0,65	24	1,00	3,40	1,40
21	0,50	0,60	0,00	28	0,00	1,40	0,80
24	1,80	0,20	0,00	32	0,00	0,20	0,10
27	2,00	0,10	0,00	36	0,00	1,10	0,30
30	3,10	2,10	1,90	40	0,00	1,00	1,20

4. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Bu çalışmada, çok fazlı SDD devresinin tüm çıkış akımlarında maksimum verimle çalışmasını sağlamak için yeni bir algoritma önerilmiştir. Önerilen algoritmanın doğruluğunu göstermek üzere dört fazlı uygulama devresi gerçekleştirilmiştir. Devrenin kontrolünde mikrokontrolcü kullanılmıştır. Dönüştürücü üç farklı anahtarlama frekansı için sabit ve değişken çalışma modlarında çalıştırılmıştır. Her bir çalışma modu için verim değerleri tespit edilmiştir. Sistemin çalışma frekansı ile aktif faz sayısı, belirlenen çıkış akım aralığında optimize edilmiştir. Geliştirilen algoritma sayesinde, değişken çalışma modu ile dönüştürücünün geniş çıkış akım aralığında %90'nın üzerinde verimle çalışması sağlanmıştır. Düşük çıkış akımlarında aktif faz sayısı minimumda tutulması gerektiği görülmüştür. Yüksek çıkış akımlarında aktif dönüştürücü sayısının artırılması ve anahtarlama frekansının düşürülmesi ile maksimum verimin elde edildiği görülmektedir. Maksimum verim ilave bir eleman kullanılmadan sağlandığından devrenin maliyetinde artış olmamıştır. Geliştirilen algoritma dörtten fazla faz sayısına sahip SDD devrelerine kolaylıkla adapte edilebilir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Abe, K., Nishijima, K., Harada, K., Nakano, T., Nabeshima, T., & Sato, T., 2007. A novel multi-phase buck converter for lap-top pc. Power Conversion Conference-Nagoya, 885-891.
- Chang, R. C. H., Chen, W. C., & Huang, J. K. S., 2019. A 93.4% efficiency 8-mV offset voltage constant on-time buck converter with an offset cancellation technique. IEEE transactions on circuits and systems II: express briefs, 67 (10), 2069-2073.
- Erfidan, T., & Coruh, N., 2009. Microcontroller based soft-switched buck converter. 4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, 1381-1385.

- Haque, M. R., Das, S., Uddin, M. R., Leon, M. S. I., & Razzak, M. A., 2020. Performance Evaluation of 1kW Asynchronous and Synchronous Buck Converter-based Solar-powered Battery Charging System for Electric Vehicles. *IEEE Region 10 Symposium*, 770-773.
- Haque, M. R., Eka, S. Z., Ferdous, S., & Razzak, M. A., 2021. Analysis of Loss Profile and Thermal Distribution of Heat Sink of IGBT-Based Asynchronous and Synchronous Buck Converters for EV Charging System. *5th International Conference on Electronics, Materials Engineering & Nano-Technology*, 1-6.
- Huang, X., Lee, F. C., Li, Q., & Du, W., 2015. High-frequency high-efficiency GaN-based interleaved CRM bidirectional buck/boost converter with inverse coupled inductor. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 31 (6), 4343-4352.
- Kim, J. H., Lim, J. G., Chung, S. K., & Song, Y. J., 2009. DSP-based digital controller for multi-phase synchronous buck converters. *Journal of Power Electronics*, 9(3), 410-417.
- Koran, A., LaBella, T., & Lai, J. S. 2013. High efficiency photovoltaic source simulator with fast response time for solar power conditioning systems evaluation. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 29 (3), 1285-1297.
- Koutroulis, E., Kalaitzakis, K., & Voulgaris, N. C., 2001. Development of a microcontroller-based, photovoltaic maximum power point tracking control system. *IEEE Transactions on power electronics*, 16(1), 46-54.
- Kroics, K., 2013. Digital control of variable frequency interleaved DC-DC converter. *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*, pp. 124-129.
- Kumar, S., & Thakura, P., 2017. Microcontroller based DC-DC Cascode Buck-Boost Converter. *Third International Conference on Advances in Electrical, Electronics, Information, Communication and Bio-Informatics*, 289-294.
- Li, Q. M., 2003. A low-cost configurable PWM controller using programmable system-on-chip. *34th Annual Conference on Power Electronics Specialist*, 3, 1169-1174.
- Morais, V., & Martins, A., 2022. Modelling, Analysis and Control of Multiphase Synchronous Buck Converters. *Journal of Electrical Systems*, 18 (1), 132-149.
- Nagaraja, H. N., Kastha, D., & Petra, A. (2010). Design principles of a symmetrically coupled inductor structure for multiphase synchronous buck converters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(3), 988-997.
- Parisi, C., 2021. Multiphase Buck Design from Start to Finish (Part 1) Application Report. Texas Instruments.
- Piispanen, S., 2019. SIMPLIS efficiency model for a synchronous multiphase buck converter. *Yüksek Lisans Tezi, Tampere Üniversitesi, Finlandiya*.
- Prasad, S.A.H., Kariyappa, B. S., Nagaraj, R., & Thakur S. K., 2009. Micro Controller Based Ac Power Controller. *Wireless Sensor Network*, 2, 61-121.
- Sanchez, J., & Canton, M. P., 2009. *Microcontroller Programming the microchip pic*, 1st edition.
- Shen, W., Renken, F., & Lascu, D., 2020. A New Multiphase ZVT-PWM Synchronous Buck Converter. *International Symposium on Electronics and Telecommunications*, 1-4.
- Stephens, K. P., 2021. Multiphase Buck Converter Implementing Gallium Nitride Semiconductors. *Bitirme Projesi Sonuç Raporu, California Politeknik Eyalet Üniversitesi, ABD*.
- Talebian, I., Alavi, P., Marzang, V., Babaei, E., & Khoshkbar-Sadigh, A., 2021. Analysis, Design, and Investigation of a Soft-Switched Buck Converter with High Efficiency. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 37 (6), 6899-6912.
- Texas Instruments, 2019. TPS56339 Datasheet, SLVSEI2A.
- Texas Instruments, 2021. LM2596 Datasheet, SNVS124F.
- Tutaev, G., Bobrov, M., Fedotov, Y., Dubov, N., & Artamonov, V., 2019. Research of IGBTs Thermal Modes in Power Converters. *International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency*, 478-481.
- Varghese, M., Manjunatha, A., & Snehaprabha, T., 2021. Method for improving ripple reduction during phase shedding in multiphase buck converters for SCADA systems. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 24 (1), 29-36.
- Viswanatha V., & Venkata S. R. R., 2018. Microcontroller based bidirectional buck-boost converter for photo-voltaic power plant. *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, 5 (3), 745-758.
- Wentzel, A., Hilt, O., Würfl, J., & Heinrich, W., 2020. A highly efficient GHz switching GaN-based synchronous buck converter module. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 12 (10), 945-953.
- World Energy & Climate Statistics, 2022. *World Consumption Statistics, Yearbook*.
- Yıldız, B., Gülbahçe, M. O., & Kocabaş, D. A., 2016. Nonideal Analysis and Voltage Mode Control of a Synchronous Buck Converter. *Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu*, 392-396.