

Senkron Buck Dönüştürücülerde Sıfır Gerilimde Geçiş (ZVT) Tekniği Kullanılarak Anahtarlama Kayıplarının Azaltılması

¹* Muhammet Abdullah Erel and Muhammet Garip²

¹Yıldız Teknik Üniversitesi, Davutpaşa Kampüsü, İstanbul, Türkiye

²Makine Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Yıldız Teknik Üniversitesi, Türkiye

Özet

Bu çalışmada, senkron buck dönüştürücülerde sıfır gerilimde geçiş (ZVT) tekniği kullanılarak anahtarlama kayıplarının azaltılması amaçlanmıştır. Bu amaçla öncelikle anahtarlama kayıplarını azaltmak üzere bir devre üzerinde çalışıldı. Uygulamaya esas alınan devre Psim yazılımıyla bilgisayar ortamında çalıştırıldı ve analiz edildi. Yapılan analiz sonucu yeni sistemin, standart dönüştürücüye göre daha yüksek frekansta ve değişik yük aralıklarında anahtarlama kayıplarının daha az olduğu ve yüksek verimde çalıştığı gözlemlenmiştir. Ayrıca analiz sonuçları benzer çalışmalardan elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmış olup birbirine yakın olduğu görülmüştür. Önerilen yeni sistemin kullanım alanının genişlemesiyle ekonomiye önemli katkılarının sağlanacağı beklenmektedir.

Anahtar kelimeler: Senkron Dönüştürücüler, Düşürücü(Buck) Dönüştürücüler, Yumuşak Anahtarlama

Reducing Switching Loss Using Zero Voltage Transition (ZVT) in Synchronous Buck Converters

¹ Muhammet Abdullah Erel and ²Muhammet Garip

¹Yıldız Technical University, Davutpasa Campus, İstanbul, Türkiye

²Faculty of Mechanical Engineering , Department of Mechatronics Engineering, Yıldız Technical University, Turkey

Abstract

In this study, reducing switching losses is aimed using zero voltage transition (ZVT) technique in synchronous buck converters. For this purpose, firstly, a circuit has been studied to reduce switching losses. Application circuit has been simulated and analyzed using Prism software in computer. According to the analysis result, it has been observed that the new system works in higher frequencies and has less switching loss in different load ranges and works with high efficiency when it is compared with standard converters. Also, the analysis results have been compared with the results from similar study and the results have been found to be close to each other. It is expected to provide a significant contribution to the economy when the use of the proposed new system will increase.

Key words: Synchronous Converters, Buck converters, Soft Switching

1. Giriş

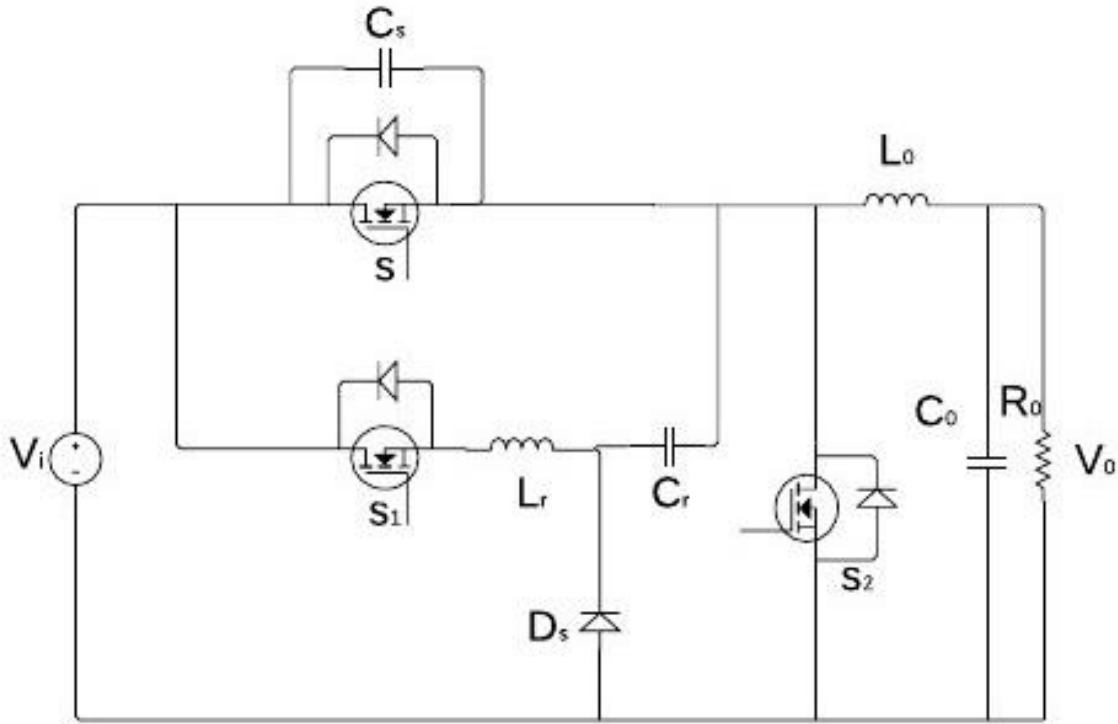
Teknolojideki hızlı gelişmeler sonucu mobil cihazlara olan ihtiyaç artmış ve buna bağlı olarak Doğru Akım (DA) kullanımı da yaygınlaşmıştır. Bu bağlamda, DA kullanımına olan talebin büyümesi ile birlikte DA-DA dönüştürücülerin önemi de artmıştır. Bu doğal gelişmenin bir sonucu olarak gerek bilimsel gerekse uygulamalı birçok araştırma bu alana yönelmiştir. Konu ile alakalı birçok bilim adamı çalışmalarını bu konu üzerine odaklamışlardır. Nihan Altıntaş yapmış olduğu yüksek lisans tez çalışmasında, DC-DC dönüştürücüler ile kontrol teknikleri ve yumuşak anahtarlama tekniklerini incelemiş ve bu kapsamda sıfır gerilim geçişli PWM DC-DC dönüştürücülerini ayrıntılı olarak ele almıştır. Ayrıca çalışmasında yeni bir aktif bastırma hücresi kullanılan yükseltici dönüştürücü ile diğer dönüştürücüler karşılaştırmıştır[1]. Yapılan başka bir çalışmada, taşınabilir sistemler için düşük çıkış gerilimi ve yüksek verimliliğe sahip senkron buck dönüştürücü tasarlanmış ve sistemdeki kayıplar yardımcı bir devre kullanılarak yumuşak anahtarlama tekniği ile elimine edilmiştir. Önerilen çalışmada teorik analiz, bilgisayar simülasyonu ve deneysel sonuçlar karşılaştırmalı olarak sunulmuştur[2,3]. N.Z. Yahaya ve arkadaşları sabit yük şartları altında yumuşak anahtarlama senkron buck dönüştürücü üzerinde çalışmışlar ve bir takım geliştirmeler yapmışlardır. Onlar rezonans kapı sürücü (RGD) devresinde yüksek güç mosfeti kullanmışlardır[4]. Ehsan Adib ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, senkron doğrultuculu ZVT dönüştürücülerini ayrıntılı olarak tanıttılar, analiz etmişler, tasarımda dikkat edilecek hususları anlatmışlar ve deneysel sonuçları ile teorik sonuçları karşılaştırmışlardır[5]. A. Devrim Erdoğan ve M. Timur Aydemir, paralel bağlı buck türü dc/dc dönüştürücülerin çıkış akım ve gerilimlerdeki dalgalanmaların paralel bağlı dönüştürücü sayısına ve anahtarların doluluk oranına (duty cycle) bağlı olarak nasıl değiştiğini incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçları sayısal benzetim ve deneysel çalışma sonuçlarıyla da karşılaştırmışlardır[6]. In-Hwan Oh hafif ve tam yük şartlarında sıfır gerilim anahtarlama (ZVS) için yeni bir yumuşak anahtarlama senkron buck dönüştürücü geliştirmiştir. Onun tarafından geliştirilen topoloji herhangi bir yük şartı altında iki mosfet içinde ZVS şartlarını etkin olarak oluşturabilmektedir[7].

Bu çalışmada öncelikle anahtarlama kayıplarını azaltmak üzere bir devre üzerinde çalışıldı. Uygulamaya esas alınan devre Psim yazılımıyla bilgisayar ortamında çalıştırıldı ve analiz edildi. Analiz sonuçları benzer çalışmalardan elde edilen sonuçlar ile karşılaştırıldı ve çok yakın değerler elde edildi.

2. Devrenin Tanıtımı

Üzerinde çalışılan senkron buck dönüştürücünün devre şeması[3] şekil 1’de gösterilmektedir. Dönüştürücü S ve S2 anahtarları, çıkış filtre endüktansı L ve çıkış filtre kapasitöründen C oluşmaktadır. Yardımcı devre ise S1 anahtarı, Lr endüktansı ve Cr kapasitöründen oluşmaktadır. Dönüştürücünün daha basit bir şekilde analiz edilebilmesi bakımından bütün yarı iletkenler ideal olarak kabul edilmiştir. Ayrıca Lo endüktans akımı ve giriş gerilimi anahtarlama döngüsü içerisinde sabit kabul edildi. Bir buck dönüştürücü zorlamalı komütasyonlu devresidir. Öncelikle frekansa ve güce bağlı olarak BJT, IGBT ve MOSFET; çok yüksek güçlerde ise SCR kullanılır.

Uygulama alanları, DC motor kontrolü, akümülatör şarjı, anahtarlama güç kaynakları, DC gerilim regülatörleri olarak sıralanabilir. D diyodu, çıkış veya endüktans akımının devamını veya sürekliliğini sağlar. Bu diyodun kullanılması zorunludur. Aksi halde, akımın ani olarak kesilmesiyle, L_f endüktansında U_{d1} kaynak gerilimini destekleyecek yönde büyük değerli bir emk oluşur. Bu durumda, $U_{d1} + emk$ toplam gerilimi elemanı veya yükü tahrip eder. Frekans arttıkça, çıkış akım ve gerilimindeki dalgalanmalar azalır. Dolayısıyla, frekans yükseldikçe, filtre elemanları küçülür, devrenin boyutu ile fiyatı düşer ve güç yoğunluğu artar. Çalışma frekansı doğrudan kullanılan elemana bağlıdır. L_f endüktansı, akımı sürekli ve sabit hale getirir veya akımı düzgünleştirir.



Şekil 1. Devre Şeması

Şekil 1'den de anlaşılacağı gibi bir senkron buck dönüştürücü klasik buck dönüştürücü devre topolojisinin dönüştürülmüş/geliştirilmiş bir versiyonudur. Söz konusu modifikasyon sonucu ortaya çıkan maliyet artışı ile verimlilikteki iyileşme dengesi dikkate alınması gerekmektedir. Standart buck dönüştürücülerde güç kaybı önemli ölçüde çalışma döngüsüne bağlıdır. Bundan dolayı düşük çalışma döngülü işlemler için tasarlanan sistemler daha fazla kayba maruz olurlar. Böyle sistemler için bir senkron buck dönüştürücü tasarımı göz önüne almak bir avantajdır. Ancak bu avantajı yanında yeni sistemin getirdiği maliyetler göz ardı edilmemelidir.

2.1 Devrenin Çalışma Aralıkları

Mod 1 (t_0, t_1)

$t=t_0$ 'dan önce, S2'nin esas(body) diyotu iletimdeyken; ana S anahtarı ve yardımcı S1 anahtarı kapalıdır. t_0 'da sıfır-akım açık(turn-on) olmasını fark eden yardımcı S1 anahtarı, L_r rezonans endüktans seri gibi açılır. L_r rezonans endüktansı ve L_r rezonans kapasitansındaki akım i_{S2} 'deki akım düşümüyle aynı oranda yükselir. Bu modda L_r ve rezonans kapasitörü C_r arasında rezonans oluşur. Mod, S2'nin esas diyotunun iletimi durdurması sonucunda i_{Lr} 'nin I_0 'a ulaşır ve i_{S2} 'nin sıfıra düşmesiyle $t=t_1$ 'de sona erer. Bu devreyi kontrol eden gerilim ve akım ifadeleri aşağıda belirtilmiştir.

$$i_{S2} = I_0 - i_{Lr} \quad (1)$$

$$i_{Lr}(t - t_0) = \frac{V_i}{Z} \sin \omega(t - t_0) \quad (2)$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L_r C_r}} = \text{Rezonans Frekansı}$$

$$Z = \sqrt{L_r / C_r} = \text{Karakteristik Empedans}$$

$$t_{01} = t_1 - t_0 = \frac{1}{\omega} \sin^{-1} \left(\frac{I_0 Z_i}{V_i} \right) \quad (3)$$

$$V_{Cr}(t_1 - t_0) = V_{Cr1} \quad (4)$$

$$i_{Lr}(t_1 - t_0) = I_0 \quad (5)$$

Mod 2 (t_1, t_2)

L_r ve C_r rezonans olmaya devam eder. t_1 'de senkron S2 anahtarı ZVS altında açılır. Bu mod, i_{Lr} akımının maksimum değeri i_{Lrmax} 'e ulaşır ZVS altında S2 anahtarını kapatmasıyla son bulması için gerçekleştirilir.

$$i_{S2} = i_{Lr0} - I_0 \quad (6)$$

$$i_{Lr}(t - t_1) = \frac{V_i - V_{Cr1}}{Z} \sin \omega(t - t_1) +$$

$$I_0 \cos(t - t_1) \quad (7)$$

$$i_{Lr}(t_2 - t_1) = I_{Lrmax} \quad (8)$$

$$t_{12} = \frac{1}{\omega} \tan^{-1} \left(\frac{V_i - V_{Cr1}}{I_0 Z} \right) \quad (9)$$

$$V_{Cr}(t_2 - t_1) = V_{Cr2} \quad (10)$$

Mod 3 (t_2, t_3)

t_2 'de, i_{Lr} maksimum değeri olan i_{Lrmax} 'e ulaşır. i_{Lr} 'nin I_0 yük akımından fazla olması dolayısıyla, CS kapasitörü, esas diyotun iletimine sebep olarak ana anahtar S'in esas diyotu boyunca yüklenerek ve yükünü boşaltacak. Bu mod i_{Lr} rezonans akımının I_0 yük akımına düşmesiyle sona erer. Bu sayede ana S anahtarının esas diyotu boyunca akım sıfır olur ve esas diyotun kapanmasına sebep olur. Aynı anda ana S anahtarı ZVS altında açılır. Bu modun gerilim ve akım ifadeleri aşağıdaki gibidir.

$$i_{Lr}(t - t_2) = -\frac{V_{Cr2}}{Z} \sin \omega(t - t_2) + I_{Lrmax} \cos \omega(t - t_2) \quad (11)$$

$$t_{23} = \frac{1}{\omega} [\tan^{-1} \left(\frac{I_{Lrmax} Z}{V_{Cr2}} \right) - \sin^{-1}(I_0)] \quad (12)$$

$$i_{Lr}(t_{23}) = I_0 \quad (13)$$

$$V_{Cr}(t_{23}) = V_{Cr3} \quad (14)$$

Mod 4 (t_3, t_4)

t_3 'de, ana anahtar ZVS ile açılır. Bu aşamada, i_S 'in yükselme oranı L_r ve C_r arasında rezonans tarafından belirlenir. Rezonans süreci bu modda devam eder ve i_{Lr} akımı düşmeye devam eder. Bu mod, i_{Lr} sıfıra düşünce ve S1 ZCS ile kapatılabilince sona erer. Bu modun gerilim ve akım ifadeleri aşağıdaki gibidir.

$$i_{Lr}(t - t_3) = -\frac{V_{Cr3}}{Z} \sin \omega(t - t_3) +$$

$$I_0 \cos \omega (t - t_3) \quad (15)$$

$$i_{Lr} = 0 \quad (16)$$

$$t_{34} = \tan^{-1} \left(\frac{I_0 Z}{V_{Cr3}} \right) \quad (17)$$

$$V_{Cr}(t_4) = V_{Crmax} \quad (18)$$

Mod 5 (t_4, t_5)

t_4 'de yardımcı anahtar S1 ZCS ile kapatılır. S1'in esas diyotu, rezonans kapasitansın Cr'in deşarj olmaya başlamasından dolayı iletme baslar. i_{Lr} rezonans akımı ters yönde yükselerek maksim negatife ulaşır ve sifıra yükselir. Bu anda S1 esas diyotu kapanır ve mod sona erer. Bu modu tanımlayan ifadeler aşağıdaki gibidir.

$$i_{Lr}(t - t_4) = \frac{V_{Crmax}}{Z} \sin \omega(t - t_4) \quad (19)$$

$$i_{Lr}(t_5) = 0 \quad (20)$$

$$t_{45} = \frac{\pi}{\omega} \quad (21)$$

$$V_{Cr}(t_5) = -V_{Cr4} \quad (22)$$

Mod 6 (t_5, t_6)

S1'in esas diyotunun t_5 'de kapanmasıyla şimdi sadece ana S anahtarı yük akimini taşır. Bu modda rezonans yoktur ve devre çalışması konvansiyonel PWM buck dönüştürücü ile aynıdır. Bu modun gerilim ve akim ifadeleri aşağıdaki gibidir.

$$i_s = I_0 \quad (23)$$

$$i_{Lr}(t_6) = 0 \quad (24)$$

$$V_{Cr}(t_6) = -V_{Cr4} \quad (25)$$

Mod 7 (t_6, t_7)

t_6 'da ana S anahtarı ZVS ile kapanır. Schottky diyotu iletme baslar. Cr kapasitansında depo edilen rezonans enerjisini çok kısa bir zaman aralığı için yüksek frekans Schottky diyotu Ds boyunca yüke doğru deşarj olur. Bunun sonucunda çıkış geriliminin iletim kayıp ve düşüşleri çok düşük olur. Bu mod Cr tamamen deşarj olduğunda sona erer. Bu modu tanımlayan denklemler aşağıda verilmiştir.

$$V_{Cr}(t - t_6) = -V_{Cr4} + \frac{I_0}{C_r}(t - t_6) \quad (26)$$

$$V_{Cr}(t_7) = 0 \quad (27)$$

$$t_{67} = \frac{C_r V_{Cr4}}{I_0} \quad (28)$$

Mod 8 (t_7, t_8)

t_7 'de, S2 anahtarının esas diyotu, Cr'nin tam deşarj olması ve Schottky diyotunun ZVS altında kapanmasıyla açık hale gelir. Ölü zaman kaybı konvansiyonel senkron buck dönüştürücülere kıyasla göz ardı edilecek küçüklüktedir. Bu mod boyunca, S1 anahtarı sıradaki anahtarlama döngüsünde açılana kadar, dönüştürücü, konvansiyonel PWM buck dönüştürücü gibi çalışır. Bu modu tanımlayan ifadeler aşağıdaki gibidir.[2]

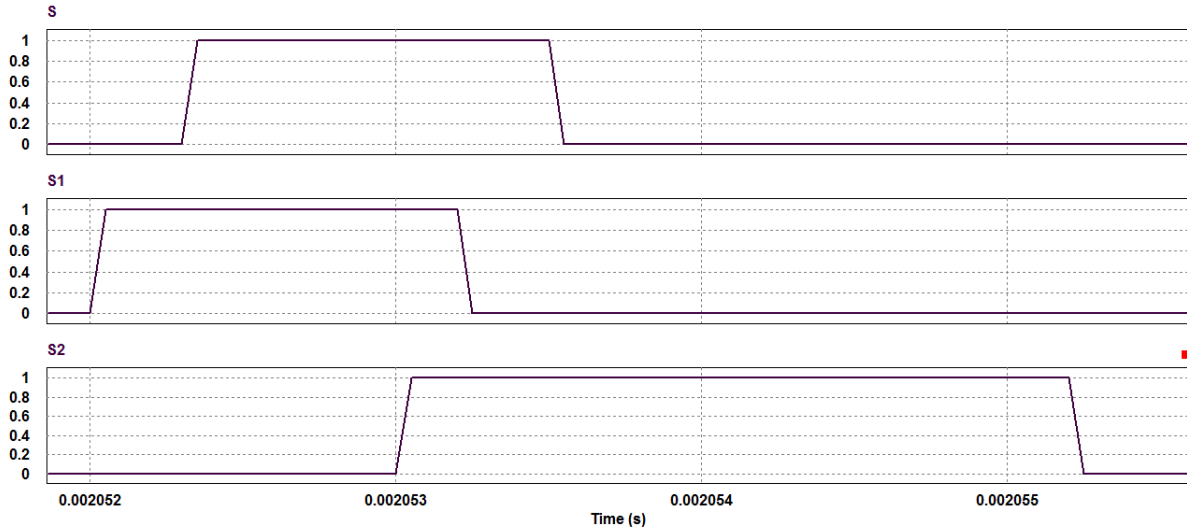
$$i_{S2} = I_0 \quad (29)$$

3. Simülasyon Sonuçları ve Analiz

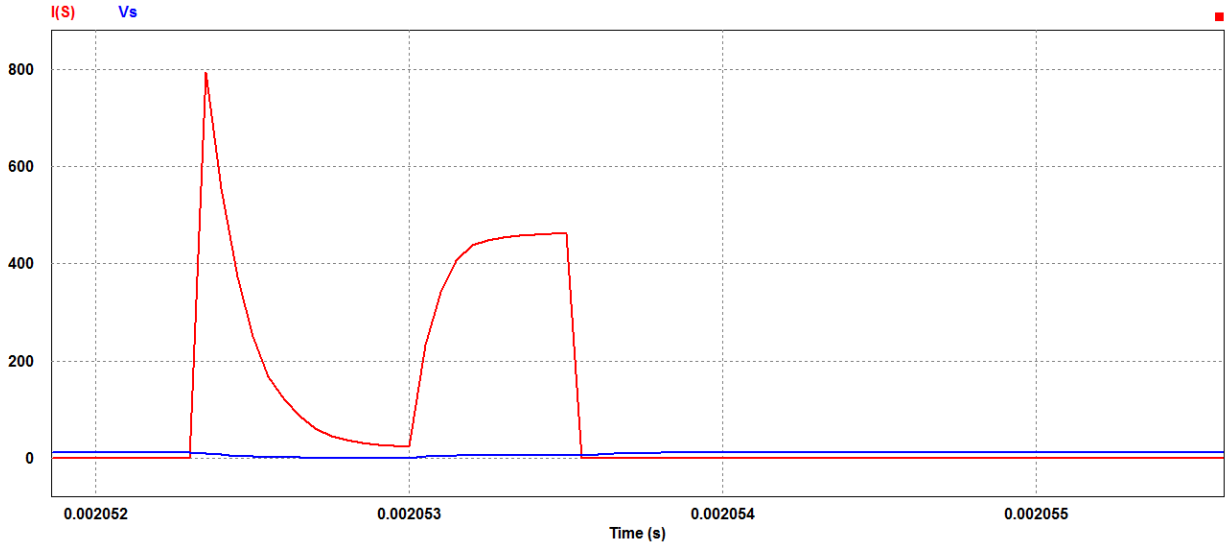
Şekil 1'de sunulan devre Psim Versiyon 9.0 simülasyon yazılımı kullanılarak analiz edilmiştir. Karşılaştırma ve modelin doğrulanması bakımından devre elemanlarına ait parametre değerlerinin seçiminde, özellikle deneysel çalışmalardaki verilere bağlı kalınmasına özen gösterilmiştir[8]. Başlıca devre elemanları ve parametreler Tablo 1'de gösterilmiştir. Simülasyon sonuçları sırasıyla Şekil 2'den başlayarak Şekil 7'ye kadar gösterilmiştir.

Tablo 1. Dönüştürücüde Kullanılan Devre Elemanları ve Değerleri

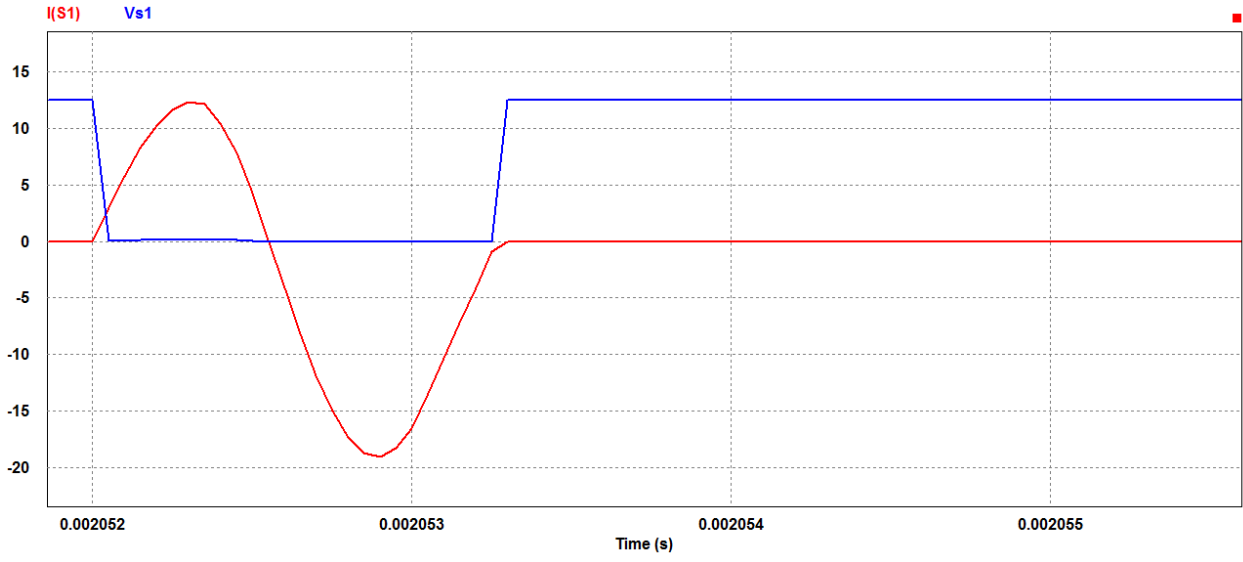
Devre Elemanı	Değeri
Ana Anahtar, S	ideal
Yardımcı Anahtar, S1	ideal
Senkron Anahtar, S2	ideal
Ana Diyot, D	ideal
Kapasitör, Cs	10 μ F
Rezonans Endüktansı, Lr	200nH
Rezonans Kapasitörü, Cr	220nF
Çıkış Endüktansı, Lo	2,2 μ H
Çıkış Kapasitörü, Co	120 μ F
Çıkış Direnci, Ro	3,3ohm

**Şekil 2.** S, S1 ve S2 anahtarlarının kontrol sinyalleri

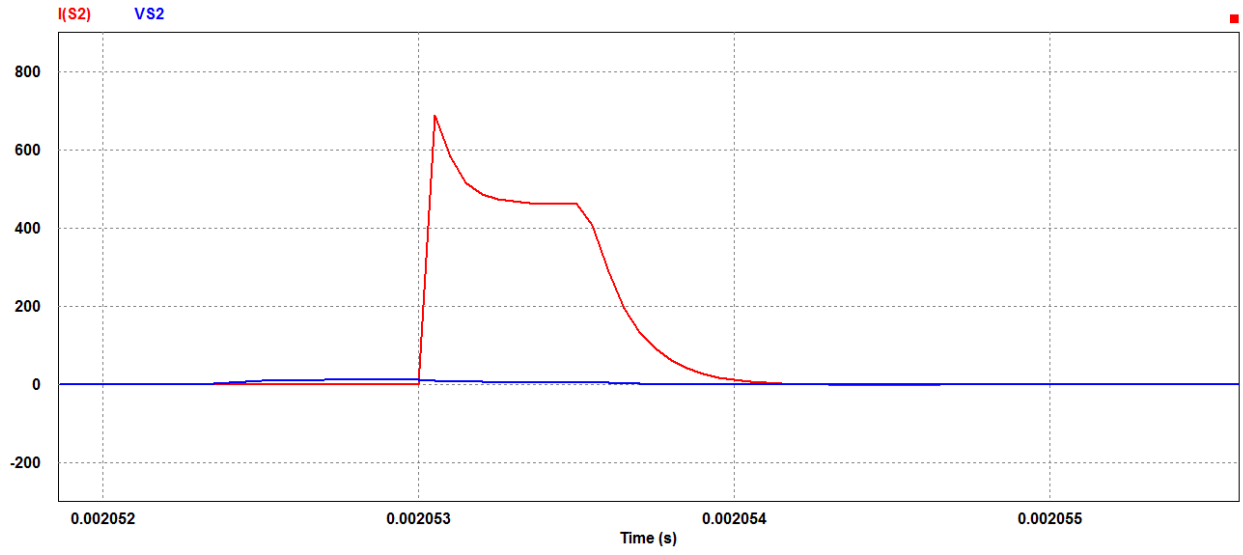
Şekil 2’de S, S1 ve S2 anahtarlarının zamana göre çalışma aralıklarını göstermektedir. Şekilden görüleceği üzere her bir anahtarın sinyal başlangıcı ve çalışma periyotları arasında farklılıklar vardır. Hesaba dayalı olarak bulunan çalışma periyotları arasındaki bu değişimler senkron buck dönüştürücünün ZVT tekniği ile uyumlu çalışabilmesi için önem arz etmektedir. Şekil 3’te ana anahtarın, Şekil 4’te yardımcı anahtarın ve Şekil 5’te senkron anahtarın zamana göre akım ve gerilim değişimi gösterilmektedir. Yardımcı devrenin endüktans akımı (i_{Lr}) ve kapasitör gerilimi (v_{Cr}) Şekil 6’da, ana diyotun bir periyot içerisindeki akım ve gerilim değişimleri ise Şekil 7’de sunulmuştur. Elde edilen bu sonuçlar daha önce yapılan benzer çalışmaların[2,8] sonuçları ile karşılaştırılmış ve oldukça yakın olduğu görülmüştür.



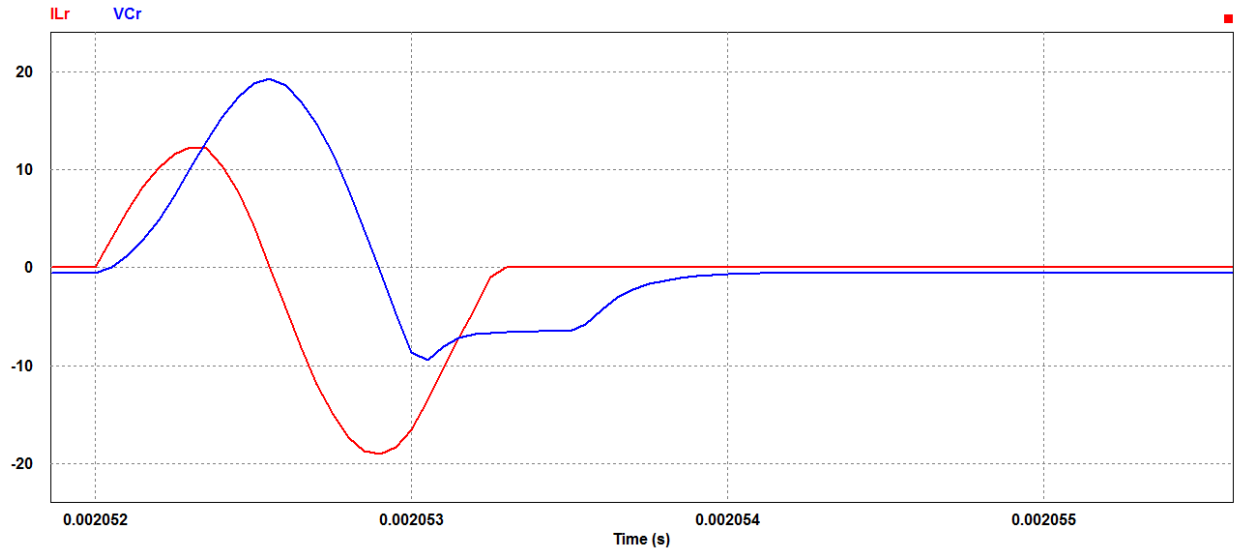
Şekil 3. Ana anahtarın(S) akım $i(S)$ ve gerilim $v(S)$ değişimi



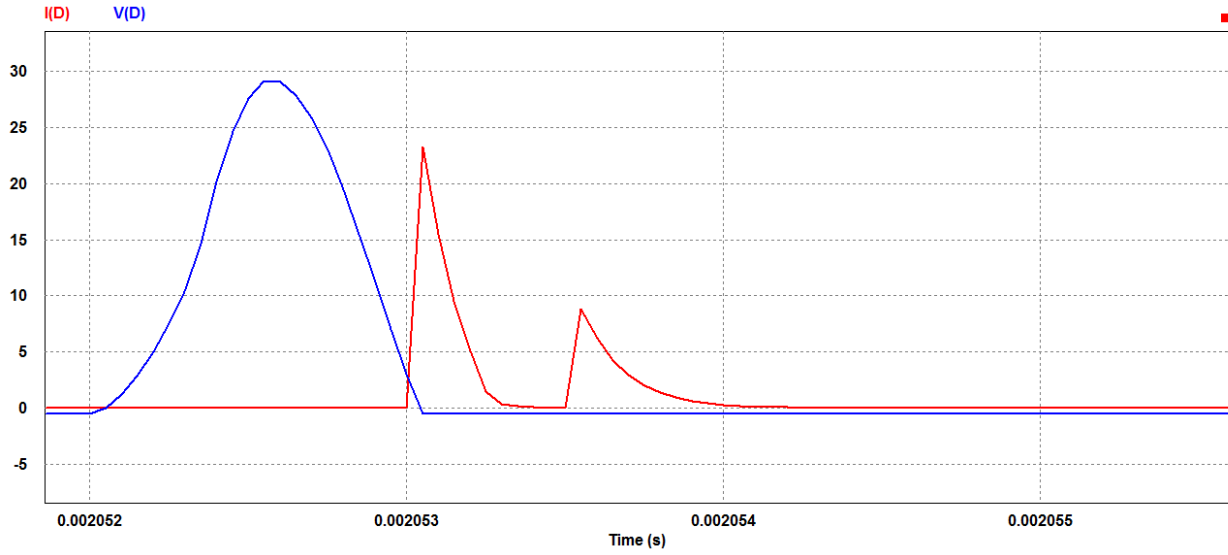
Şekil 4. Yardımcı anahtarın(S1) akım $i(S1)$ ve gerilim $v(S1)$ değişimi



Şekil 5. Senkron anahtarın(S2) akım $i(S2)$ ve gerilim $v(S2)$ değışimi



Şekil 6. Yardımcı devrenin(S1) endüktans akımı (iLr) ve kapasitör gerilimi (vCr) değeri



Şekil 7. Ana diyotun (D) akım $i(D)$ ve gerilim $v(D)$ değerleri

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, senkron buck dönüştürücülerde sıfır gerilimde geçiş (ZVT) tekniği kullanılarak anahtarlama kayıplarının azaltılması amaçlanmıştır. Bu kapsamda standart buck dönüştürücüden farklı olarak ZVT tekniğini kullanan senkron bir devre üzerinde simülasyon çalışması yapılarak sistem analiz edilmiştir. Yapılan analiz sonucu yeni sistemin, standart dönüştürücüye göre daha yüksek frekansta ve değişik yük aralıklarında anahtarlama kayıplarının daha az olduğu ve yüksek verimde çalıştığı gözlemlenmiştir. Diğer taraftan ana diyot üzerinde akım stresleri azalmış, yardımcı devre üzerindeki elemanların maruz kaldığı akım ve gerilim değerleri güvenli sınırlara çekilmiştir. Üstelik yeni sistemin kontrolü kolay, yapısal olarak basit ve maliyeti de çok fazla değildir. Söz edilen faydalar göz önüne alındığında önerilen yeni sistemin kullanım alanının genişlemesiyle ekonomiye önemli katkılarının sağlanacağı beklenmektedir.

Referanslar

- [1] N. Altıntaş, Yumuşak Anahtarlama Dc-Dc Dönüştürücülerin İncelenmesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2007
- [2] A. K. Panda, ve Aroul. K, A Novel Technique to Reduce the Switching Losses in a Synchronous Buck Converter, Power Electronics, Drives and Energy Systems, PEDES '06. International Conference, 2006
- [3] S. Pattnaik, A. K. Panda, Aroul K., K. K. Mahapatra, Experimental Validation of A Novel Zero Voltage Transition Synchronous Buck Converter, TENCON 2008 - IEEE Region 10 Conference, 2008
- [4] N.Z. Yahaya, K.M. Begam and M. Awan, Design & Simulation of an Improved Soft-switched Synchronous Buck Converter, Third Asia International Conference on Modelling & Simulation, 2009

- [5] Ehsan Adib, ve Hosein Farzanehfard, Zero-Voltage-Transition PWM Converters With Synchronous Rectifier, Ieee Transactions On Power Electronics, Vol. 25, No. 1, January 2010,
- [6] A. Devrim Erdoğan M. Timur Aydemir, Paralel Bağlı Buck Türü Dc/Dc Dönüştürücülerde Dalgalanma Analizi, Elektrik -Elektronik - Bilgisayar Mühendisliği 10. Ulusal Kongresi, 2003
- [7] In-Hwan Oh, A Soft-Switching Synchronous Buck Converter for Zero Voltage Switching (ZVS) in Light and Full Load Conditions, Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC 2008. Twenty-Third Annual IEEE, 2008
- [8] Mark Cory, Conventional And Zvt Synchronous Buck Converter Design, Analysis, And Measurement, B.S. Electrical Engineering Purdue University, Master of Science, 2010