

Bir Senkron Alçaltan Çeviricinin İdeal Olmayan Analizi ve Çıkış Geriliminin Kontrolü

Nonideal Analysis and Voltage Mode Control of a Synchronous Buck Converter

Barış Yıldız, Mehmet Onur Gülbahçe, Derya Ahmet Kocabaş

Elektrik Mühendisliği Bölümü, Elektrik Elektronik Fakültesi
İstanbul Teknik Üniversitesi

barisyildiz@itu.edu.tr, ogulbahce@itu.edu.tr, kocabasde@itu.edu.tr

Özet

Senkron ve senkron olmayan alçaltan çeviriciler düşük gerilim, yüksek akım ihtiyacı olan her yerde oldukça sık kullanılan yalıtımsız DA-DA çeviricilerdir.

Bu çalışmada 225 W gücünde sürekli endüktans akımı koşulunda çalışan bir senkron alçaltan çevirici (SAÇ) tasarlanmıştır. Çevirici ilk olarak ideal olmayan durum için sürekli halde incelenmiştir. İdeal olmayan durum incelemesinde anahtarlama elemanının gerilim düşümü ve endüktans sargı direnci dikkate alınmıştır. Sonrasında MATLAB/Simulink yardımı ile çeviricinin benzetimi yapılmış ve çıkış gerilimini kontrol etmek için sayısal bir kontrolör sistemi tasarlanmıştır. Çevirici gerçekleştirildikten sonra tasarımı yapılan kontrolör sayısal işaret işleyici tabanlı bir mikrodenetleyiciye gömülmüş, değişken yük koşulları ve giriş gerilimlerinde testleri yapılmış ve sistemin başarımı irdelenmiştir.

Abstract

Synchronous and non-synchronous buck converters are non-isolated DC-DC converters which are used extensively in areas of work where low voltage and high current is required.

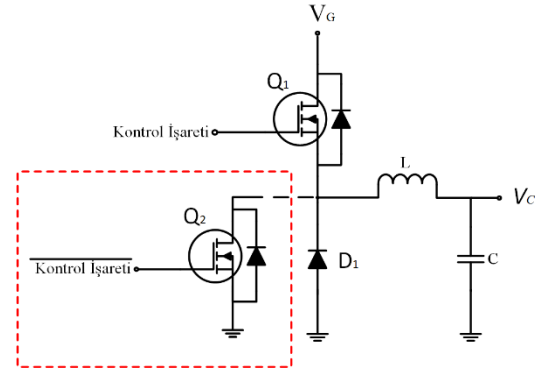
In this study, a 225 W synchronous buck converter was designed to be used in applications with low voltage and high current. Firstly, the non-ideal steady state analysis of the converter was done. During analysis, winding resistance of inductor and voltage drop of semiconductor device are taken into account. Afterwards, a digital control system was designed and the converter was simulated using MATLAB/Simulink. After the converter circuit was manufactured, the controller was embedded in a digital signal processor based microcontroller and system was tested for variable load and variable input voltage conditions and its performance was examined.

1. Giriş

Son yıllarda yüksek verimleri, düşük maliyetleri, küçük boyutları ve doğrusal gerilim düzenleyicilere göre daha az kayıplı olmalarından dolayı DA-DA çeviricilerinin önemi giderek artmıştır. Taşınabilir elektronik endüstrisinin artan talebi, anahtarlama DA-DA çeviricileri ve kontrol sistemlerinin gelişmelerini zorunlu kılmıştır [1-2]. Bu çeviricilerin en temel örneklerinden ikisi Şekil-1’de verilen ve

birbirine dönüştürülebilen, senkron ve senkron olmayan alçaltan çeviricilerdir.

Çevirici topolojisinin üzerindeki ana eleman üst taraftaki Q_1 yarı iletken güç anahtarıdır ve giriş gerilimi bu anahtarın çalışma oranı ile orantılı olarak düşürülür. Topolojide bulunan diğer elemanlardan L çıkış endüktörü, C ise çıkış kapasitörüdür. Senkron olmayan alçaltan çeviricide bir adet güç diyodu (D_1) bulunurken senkron alçaltan çeviricide bu diyodun yerini kontrollü bir yarı iletken güç anahtarı (Q_2) almıştır. Alt alta bulunan bu iki güç anahtarı senkron olarak birbirini tümleyen bir şekilde anahtarlanır [3-4].



Şekil 1: Alçaltan çevirici (Q_2 anahtarının bağlı olması durumunda “Senkron” tip olur)

SAÇ’ın en önemli üstünlüğü alt taraftaki kontrollü yarı iletken eleman üzerinde ileri yönde meydana gelen gerilim düşümünün, senkron olmayan alçaltan çeviricideki diyot üzerinde meydana gelen gerilim düşümünden daha az olması ve dolayısıyla daha az kaybın oluşmasıdır [5].

SAÇ’lerin senkron olmayan alçaltan çeviricilere göre bir diğer üstünlüğü ise düzgün bir kontrol algoritması ile kontrol edildiğinde yüksüz durumda dahi çıkış gerilimini referans geriliminde sabit tutabilmesidir. Literatürde senkron alçaltan çeviricilerin kontrolü ile ilgili çalışmalar mevcuttur [6-7].

Her iki çevirici yapısında bulunan elemanların ideal olmaması gerilim düşümü ve kayıplara sebep olacağından, açık çevrim çalışma durumunda artan yük akımında çıkış gerilimi düşer. Bu sebeple çıkış geriliminin sabit olması istenen uygulamalarda, değişik yüklenme koşullarında çıkış geriliminin bir kontrolör ile denetlenmesi gerekir [8-9]. İdeal olmayan durumda MOSFET iletim direnci veya yükte gerilim

düşümü, endüktans sargı direnci ve kondansatörün iç direnci dikkate alınmalıdır.

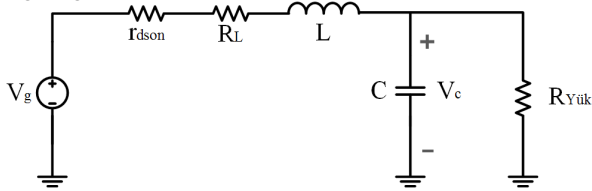
Bu çalışma kapsamında düşük gerilimli, yüksek akımlı uygulamalarda kullanılmak üzere 225 W gücünde, 0-30 V çıkış gerilimine sahip senkron alçaltan çevirici tasarlanmıştır. Devrenin sürekli hal analizi gerek benzetim ortamında, gerekse analitik olarak yapılmıştır. Tüm benzetimler MATLAB/Simulink ortamında gerçekleştirilmiş ve çıkış geriliminin kontrolü için ayrık bir geleneksel PI kontrolör tasarlanmıştır. Tasarlanan kontrolör sayısal işaret işleyici tabanlı bir mikrokontrolör olan C2000 Piccolo LaunchPad'e gömülmüş ve çeviricinin çıkış geriliminin kontrolü sağlanmıştır. Buna ek olarak tasarımı yapılan güç elektroniği çeviricisinin değişken yük koşullarında giriş geriliminde başarımı irdelenmiş ve karşılaştırmalı sonuçlar sunulmuştur.

2. SAÇ'nin Sürekli Hal Analizi

SAÇ sürekli hal durumunda çalışırken endüktans akımı ve kapasitör gerilimi periyodik olup ortalama endüktans gerilimi ve kapasitör akımı sıfırdır. Çeviricinin sürekli hal analizi dalgalılığın çok küçük olduğu varsayımı ile iki alt aralıkta incelenebilir. Birinci aralık Q_1 anahtarının iletimde, Q_2 anahtarının kesimde olduğu aralık; ikinci aralık Q_2 anahtarının iletimde, Q_1 anahtarının kesimde olduğu aralıktır [10].

- Q_1 anahtarı iletimde, Q_2 anahtarı kesimde iken;

Q_1 anahtarının iletimde, Q_2 anahtarının kesimde olduğu birinci alt aralıkta devre Şekil 2'de verilen hale gelir ve aşağıdaki eşitlikler türetilir. Bu eşitliklerde D çalışma oranı, T anahtarlama periyodu, f anahtarlama frekansı, V_g giriş gerilimi, R_L endüktansın sargı direnci, kullanılan anahtarlama elemanının iletim direnci, V_L endüktansın uç gerilimi, V_C kapasitenin ve çeviricinin çıkış gerilimi, I_C kapasitenin akımı, ΔI_L endüktans akımının dalgalılığı, ΔV_C çıkış geriliminin dalgalılığıdır.



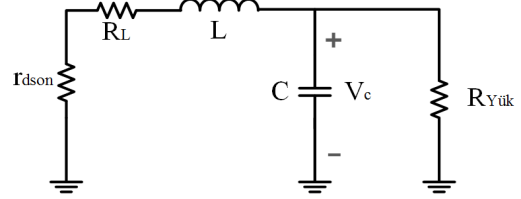
Şekil 2: Q_1 anahtarının iletimde, Q_2 anahtarının kesimde olduğu birinci alt aralıkta çalışan senkron alçaltan çevirici eşdeğer devresi

$$V_L = V_g - V_C - I_L(r_{ds_{on}} + R_L) \quad (1)$$

$$i_C = I_L - \frac{V_C}{R_{YÜK}} \quad (2)$$

- Q_1 anahtarı kesimde, Q_2 anahtarı iletimde iken;

Q_1 anahtarının kesimde, Q_2 anahtarının iletimde olduğu ikinci alt aralıkta devre Şekil 3'de verilen hale gelir ve aşağıdaki eşitlikler türetilir.

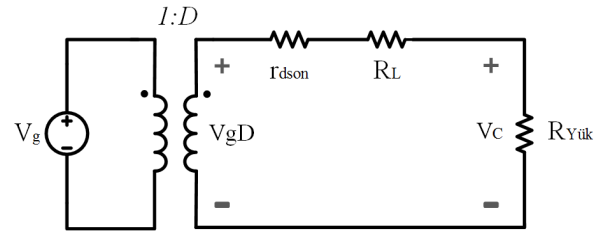


Şekil 3: Q_1 anahtarının kesimde, Q_2 anahtarının iletimde olduğu ikinci alt aralıkta çalışan senkron alçaltan çevirici eşdeğer devresi

$$V_L = -V_C - I_L(r_{ds_{on}} + R_L) \quad (3)$$

$$i_C = I_L - \frac{V_C}{R_{YÜK}} \quad (4)$$

Verilen eşitliklerle çeviricinin DA transformatörlü eşdeğer devre modeli Şekil 4'teki gibi elde edilir [5].



Şekil 4: Çeviricinin DA transformatörlü eşdeğer devresi

Elde edilen eşdeğer devreden yararlanarak çıkış geriliminin giriş gerilimi ve çalışma oranı cinsinden ifadesi (5)'te verilmiştir.

$$V_C = \frac{R_{Yük}}{R_{Yük} + R_L + r_{ds_{on}}} D V_g \quad (5)$$

Tasarımı yapılan çeviriciye ait parametreler Çizelge 1'de görülebilir.

Çizelge 1: Çeviricinin tasarım parametreleri

Parametreler	Sembolü	Değerleri
Anma giriş gerilimi	V_g	30 V
Anma çıkış gerilimi	V_C	15 V
Anma yük akımı	$I_{YÜK}$	15 A
Endüktansın sargı direnci	R_L	0.118 Ω
Mosfet iletim direnci(IRFZ44N)	$r_{ds_{on}}$	0.035 Ω
Endüktans akımının dalgalılığı	ΔI_L	0.34 A
Çıkış geriliminin dalgalılığı	ΔV_C	0.3 mV
Çıkış kapasitesi	C	1000 μF
Çıkış endüktansı	L	142 μH
Anahtarlama frekansı	f_s	150 kHz

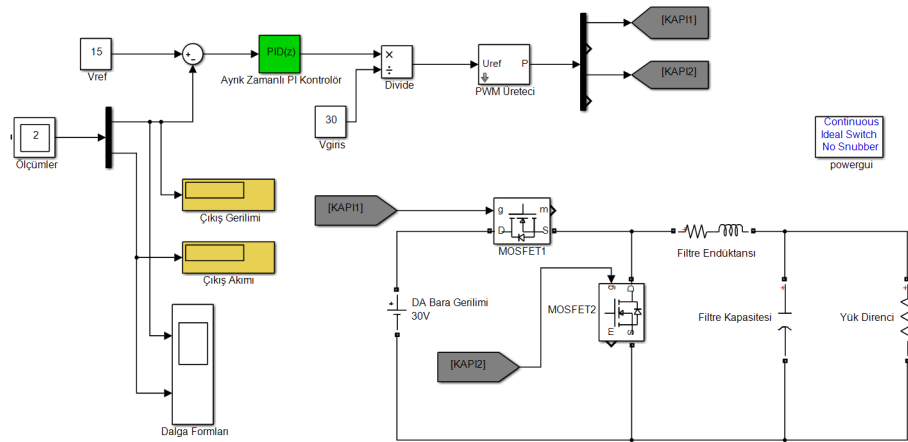
3. Senkron Alçaltan Çeviricinin Benzetimi ve Geleneksel PI Kontrolör Tasarımı

Çalışmanın bu bölümünde tasarımı yapılan çevirici için ayrı bir zamanlı bir PI kontrolör tasarlanmış ve benzetimleri MATLAB/Simulink ortamında gerçekleştirilmiştir. Öncelikle sistemin ideal olduğu durum için devre incelenmiştir [10], daha sonra ideal olmayan elemanlarla kurulan sistemin çalışması oranına bağlı transfer fonksiyonu elde edilerek (6)'da verilmiştir.

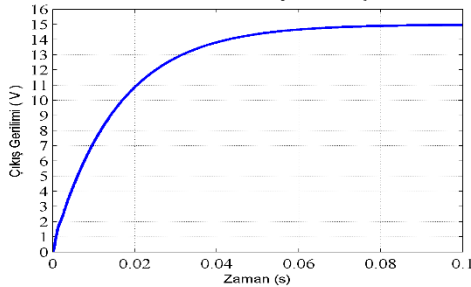
$$\frac{V_C(s)}{D(s)} = \frac{V_g}{s^2 LC + s \left[\frac{L}{R} + C(R_L + r_{ds_{on}}) \right] + \frac{R_L + r_{ds_{on}} + R_{yik}}{R_{yik}}} \quad (6)$$

Transfer fonksiyonu elde edilirken yine DA transformatörlü eşdeğer devre kullanılmıştır. Daha sonra bu transfer fonksiyonu belirli bir örneklemme zamanında “Sıfırıncı Dereceden Tutma (ZOH-Zero Order Hold) yöntemi” ile ayrıklaştırılmış ve geleneksel yapıda bir PI kontrolör tasarlanarak kontrolör katsayıları yine MATLAB/Simulink ortamında PIDTool ile belirlenmiştir.

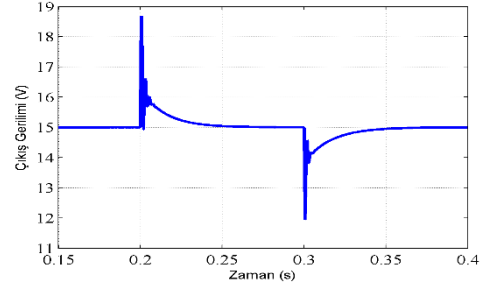
Mikrokontrolörde çalışma oranını elde etmek için ayrı PI kontrolör fonksiyonundan elde edilen çıkış gerilimi giriş gerilimi ile karşılaştırılmıştır. Benzetim sonuçlarının uygulamalı deney sonuçları ile uyumlu olması için mikrodenetleyicinin geri besleme yolu örneklem frekansı ile benzetim çalışmalarındaki örneklem frekansı aynı seçilmiştir. Simulink ortamında kurulan benzetim modeli Şekil 5'te verilmiştir. Tasarlanan SAÇ 15 V referans çıkış gerilimi için değişik yük koşullarında ve değişken giriş gerilimlerinde incelenmiş ve benzetim sonuçları Şekil 6-7-8-9'da verilmiştir.



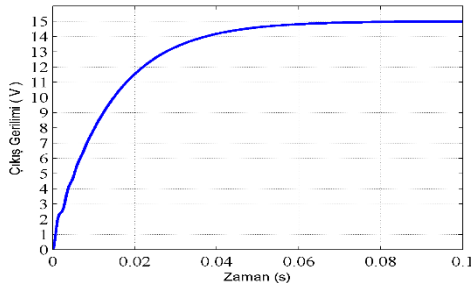
Şekil 5: Çeviricinin MATLAB/Simulink ortamında modellenmesi.



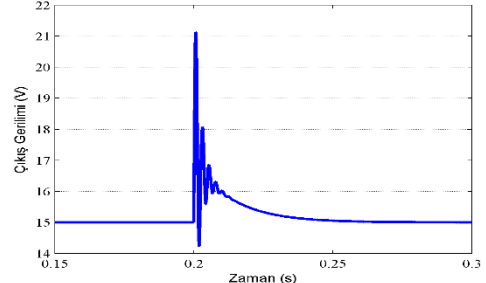
Şekil 6:Sistemin anma yükü ile başlatılmasında çıkış geriliminin değişimi



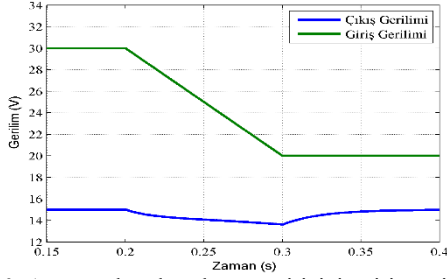
Şekil 8: Anma yükündeki SAÇ'nin yükünün %33'üne düştükten sonra tekrar anma yükü ile yüklendiği durumda çıkış geriliminin değişimi



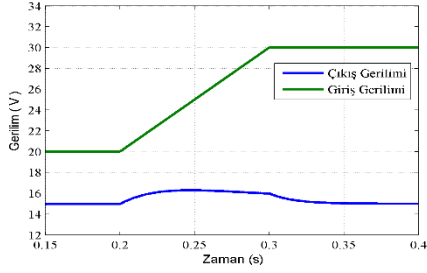
Şekil 7: Sistemin yüksüz durumda başlatılmasında çıkış geriliminin değişimi



Şekil 9: Anma yükünde çalışan çevircinin yüksüz kalması durumunda çıkış geriliminin değişimi



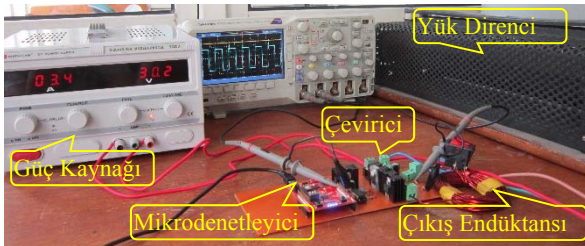
Şekil 10: Anma yükünde çalışan çeviricinin giriş geriliminin %33 azaldığı durumda çıkış geriliminin değişimi.



Şekil 11: Anma yükünde çalışan çeviricinin giriş geriliminin %50 arttığı durumda çıkış geriliminin değişimi.

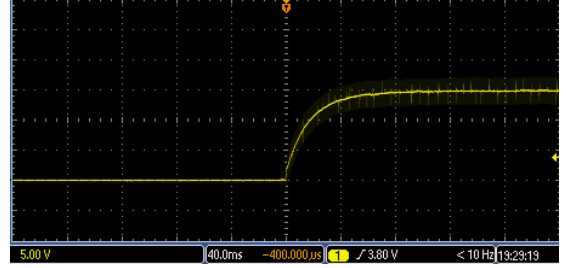
4. Test Sonuçları

Tasarımı yapılan çeviricinin elemanları boyutlandırıldıktan sonra imalatı yapılmıştır. Çıkış endüktansı, demir kayıplarından kurtulmak ve çeviricinin verimini artırmak için ferromanyetik çekirdekli yerine hava çekirdekli olarak tasarlanmıştır. Anahtarlama elemanı olarak IRFZ44N MOSFET, sürücü olarak IR2112 MOSFET sürücüsü kullanılmıştır. Bir köprü bacağı yapısında olan çeviricideki alt ve üst anahtarları sürmek için “bootstrap” tekniğinden yararlanılmıştır [11]. Tasarlanan kontrolör sayısal işaret işleyici tabanlı bir mikrokontrolör olan C2000 Piccolo LaunchPad'e gömülmüş ve çeviricinin çıkış geriliminin denetimi yapılmıştır. Tasarlanan devrenin laboratuvar ortamındaki deneylerini yapmak üzere oluşturulan düzenek Şekil 10'da verilmiştir.

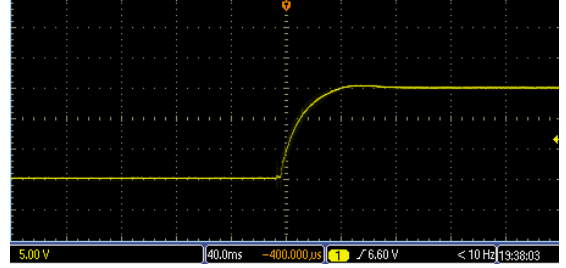


Şekil 10: Laboratuvar ortamında oluşturulan deney düzeneği.

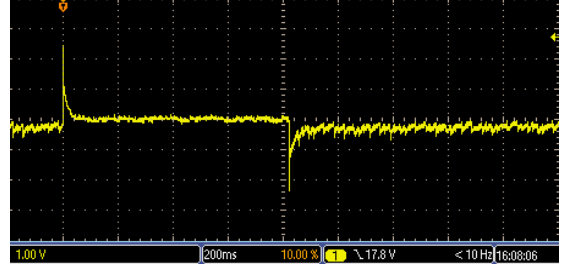
Laboratuvar ortamında yapılan deneylerde; “çeviricinin anma yükünde ve yüksüz başlatılması”, “çeviricinin anma yükünde çalışırken anma yükünün %33'üne düşmesi ve tekrar anma akımı ile yüklenmesi”, anma yükünde çalışan çeviricinin aniden yüksüz kalması ve son olarak “anma yükünde çalışan çeviricinin giriş geriliminin %33 azalması ve %50 artması” deneyleri yapılmış ve deney sonuçlarında elde edilen çıkış gerilimi dalga şekilleri Şekil 12-17 arasında verilmiştir.



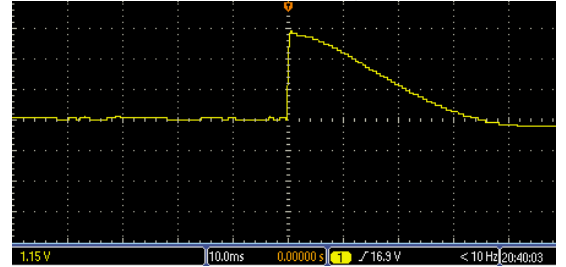
Şekil 12: Sistemin anma yükü ile başlatılmasında çıkış geriliminin değişimi (5V/DIV-40ms/TDIV).



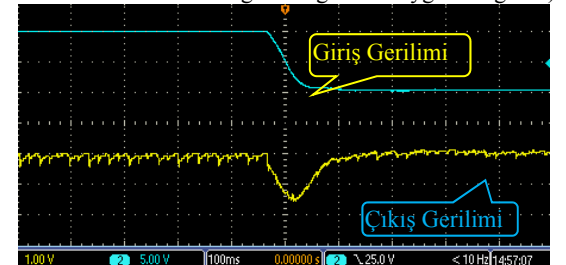
Şekil 13: Sistemin yüksüz durumda başlatılmasında çıkış geriliminin değişimi (5V/DIV-40ms/TDIV).



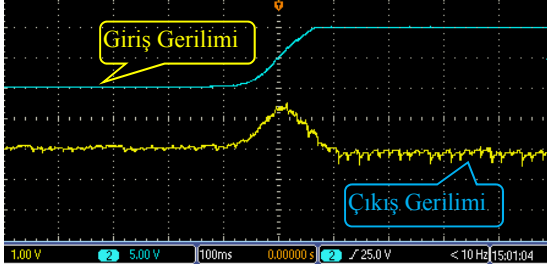
Şekil 14: Anma yükünde çalışan çeviricinin yükünün %33'üne düşüldükten sonra tekrar anma yükü ile yüklendiği durumda çıkış geriliminin değişimi (1V/Div-200ms/TimeDiv).



Şekil 15: Anma yükünde çalışan çeviricinin yüksüz kalması durumunda çıkış geriliminin değişimi (1.15V/Div-10ms/TimeDiv-15V dengeleme gerilimi uygulandığında).



Şekil 16: Anma yükünde çalışan çeviricinin giriş geriliminin %33 azaldığı durumda çıkış geriliminin değişimi (giriş gerilimi 5V/Div-100ms/TimeDiv, çıkış gerilimi 1 V/Div-100ms/TimeDiv-15V dengeleme gerilimi uygulandığında).



Şekil 17: Anma yükünde çalışan çeviricinin giriş geriliminin %50 arttığı durumda çıkış geriliminin değişimi(giriş gerilimi 5V/Div-100ms/TimeDiv, çıkış gerilimi-1 V/Div-100ms/TimeDiv-15V dengeleme gerilimi uygulandığında).

Laboratuvarda yapılan deneysel sonuçlar ile benzetim sonuçları karşılaştırılmış, tasarımı yapılan kontrolörün başarımı anma yükünde başlama durumunda karşılaştırmalı olarak Çizelge 2’de verilmiştir.

Çizelge 2: Tasarlanan kontrolörün başarımlı ölçütleri

Başarım Ölçütleri	Benzetim Sonuçları	Deney Sonuçları
Yükselme Zamanı	0.035 s	0.03608 s
Oturma Süresi (%2’lik çalışma bandı kısıtında)	0.0625 s	0.076 s
Aşım	% 0	% 2.703
Kalıcı Hal Hatası	% 0	% 2

5. Sonuçlar

Bu çalışmada sürekli endüktans akımı koşulunda çalışan bir senkron alçaltan bir çeviricinin ideal olmayan durum için incelemesi yapılmış, SAÇ’nin transfer fonksiyonu elde edilmiş ve MATLAB yardımı ile ayrıklaştırılmıştır. Benzetim çalışmalarında anahtarlama elemanının iç direnci ve endüktans sargı direnci modele ilave edilmiştir. Çeviriciye geleneksel bir ayrık PI kontrolör tasarlanmış ve bu kontrolörün başarımı benzetimler ve laboratuvarda yapılan deneysel çalışmalar karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Çeviricinin laboratuvar ortamında değişik başlama, yüklenme koşullarında ve giriş gerilimlerinde deneyleri yapılmıştır. Çalışma sonucunda modelleme ve deney sonuçlarının birbirine oldukça yakın olduğu gözlemlenmiştir.

6. Kaynaklar

- [1] Peterchev, A. ve Sanders, S., "Digital Loss Minimizing Multi-Mode Synchronous Buck Converter Control", 2004 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, 2004, Sf.3694-3699.
- [2] M. Karadeniz, M. O. Gulbahce and D. A. Kocabas, "A practical design and analysis of a high power DC to DC converter," MECHATRONIKA, 2012 15th International Symposium, Prague, 2012, pp. 1-7.
- [3] G. Suman, B. V. S. P. Kumar, M. S. Kumar, B. C. Babu and K. R. Subhashini, "Modeling, Analysis and Design of Synchronous Buck Converter Using State Space Averaging Technique for PV Energy System," Electronic System Design (ISED), 2012 International Symposium on, Kolkata, 2012, pp. 281-285.
- [4] J. P. Agrawal, "Modeling and simulation of low duty ratio buck synchronous converter under large load

current switching," 2013 IEEE 63rd Electronic Components and Technology Conference, Las Vegas, NV, 2013, pp. 2079-2082.

- [5] Erickson, R. ve Maksimovic, D., *Fundamentals of Power Electronics*, Kluwer Academic Publishers, New York, 2001.
- [6] C. G. Wilson, J. Y. Hung and R. N. Dean, "A sliding mode controller for two-phase synchronous buck converters," IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, Montreal, QC, 2012, pp. 2150-2155.
- [7] Y. Yuan, Y. Lv and G. Tong, "Study on the digitally controlled system of ZCS-QRC synchronous buck converter," Control Conference (CCC), 2011 30th Chinese, Yantai, 2011, pp. 4486-4491.
- [8] C. Chang, "Mixed voltage /current mode control of PWM synchronous buck converter," Power Electronics and Motion Control Conference, 2004. IPEMC 2004. The 4th International, Xi'an, 2004, pp. 1136-1139 Vol.3.
- [9] Jongbok Baek, Woojin Choi and B. Cho, "Digital control of synchronous buck converter with multi-mode for wide load range," Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC), 2012 7th International, Harbin, China, 2012, pp. 3028-3032.
- [10] Hart, D. , *Power Electronics*, McGraw-Hill, New York, 2011
- [11] HW floating MOS-gate drive ICs, in IR Application Note AN-978, International Rectifier Corp., El Segundo, CA