

PRATİK TASARIM METODLARIYLA DÜŞÜRÜCÜ TİP DA-DA DÖNÜŞTÜRÜCÜNÜN GELİŞTİRİLMESİ

The Development of DC-DC Buck Converter with Practical Design Methods

Emre CEBECİ, Yusuf YAŞA

Yıldız Teknik Üniversitesi
Elektrik Mühendisliği Bölümü
İstanbul, Türkiye

emrecebeci1@gmail.com, yasa@yildiz.edu.tr

Özet

Bu bildiride nominal çıkış değerleri 100V/50A olan düşürücü DA-DA dönüştürücünün tasarım ve analizi gerçekleştirilmiştir. Düşürücü DA-DA dönüştürücünün genel devre yapısı bahsedilmiş ve ardından tasarım adımları sırasıyla verilmiştir. Tüm aktif ve pasif devre bileşenlerinin değerlerinin belirlenmesinin ardından devrenin kapalı çevrim kontrolör tasarımı Matlab-SISO yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Ardından Matlab-Simulink ortamında yapılan simülasyon sonuçları verilmiş ve bu değerler tasarım değerleriyle karşılaştırılmıştır.

Abstract

In this paper, DC-DC buck converter is designed and analyzed which have 100V/50A output values. The general ideas about operating the buck converter operation is mentioned then design steps are given, respectively. All active and passive elements values of the buck converter circuit are determined and the controller design is done using Matlab-SISO tool. Finally, the simulation is executed on Matlab-Simulink software and the related result are provided and compared with the theoretical results.

1. Giriş

Günümüzde doğru akım (DA) uygulamalarına oldukça sık rastlanılmaktadır. Özellikle televizyon, telefon, bilgisayar gibi elektronik cihazlar ve birçok ev aletleri birer DA uygulamalarıdır. Uygulamaların oldukça sık olmasıyla birlikte artan enerji talebi beraberinde enerjinin verimli kullanılması talebini doğurmaktadır.

Özellikle küçük güçlü DA uygulamalarında ucuz olmasından dolayı tercih edilebilen lineer güç kaynaklarıyla karşılaştırıldığında, DA dönüştürücüleri daha yüksek güçlere yarı iletken kullanımı sayesinde daha az kayıpla ulaşılmalarını mümkün hale getirmektedir.

Temel izolesiz anahtarlama güç kaynakları; düşürücü, yükseltici ve düşürücü-yükseltici DA-DA dönüştürücüleri olmak üzere üç kısma ayrılmaktadır.

Çıkış gerilimi giriş geriliminden daima düşük ise düşürücü dönüştürücü, daima yüksek ise yükseltici dönüştürücü, düşük veya yüksek olma durumu değişkenlik göstermesi gereken uygulamalarda ise düşürücü-yükseltici DA-DA dönüştürücüleri tercih edilmektedir.



Şekil 1. Tipik anahtarlama güç kaynağı uygulaması[1]

Bu çalışmada, çıkış gerilimi dönüştürücünün giriş geriliminden daha az olduğundan düşürücü DA-DA dönüştürücü tipi tercih edilmiştir.

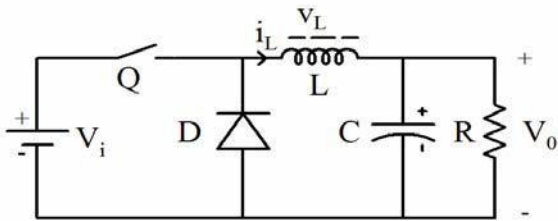
Genel olarak bildiride düşürücü DA-DA dönüştürücüler hakkında genel bilgilendirme yapılacak ardından pratik tasarım metoduyla devrede bulunan her bir aktif ve pasif elemanların değerleri belirlenecektir. Güç elektroniği devre uygulamalarında sıklıkla tercih edilen kapalı çevrim kontrolcü tasarımının adımlarından bahsedilecek ve optimum kontrolcü parametreleri belirlenecektir. Devrenin benzetim çalışması Matlab-Simulink ortamında gerçekleştirilecek ve sonuçlar, pratik tasarım metodu sonuçlarıyla karşılaştırılacaktır.

2. Düşürücü DA-DA Dönüştürücü Hakkında Ön Bilgi

Düşürücü tip DA-DA dönüştürücünün tipik devre şeması Şekil-2’de verilmektedir. Bu dönüştürücü, genel olarak; yarı iletken anahtar, diyot, endüktans ve filtre kondansatörü olmak üzere 4 elemandan oluşmaktadır. Yarı iletken anahtar olarak genellikle güç Mosfetleri(Power Mosfets) yüksek anahtarlama hızı özelliğinden dolayı tercih edilmektedir. Devrede bulunan diyot ise “Serbest Geçiş Diyotu” adıyla anılmaktadır[2]. Çalışma prensibi temelinde devre girişinde bulunan DA kaynağının belirli periyotlar ile kısılmasına dayandığından bu tip dönüştürücü “DA Kıyıcı” olarak da adlandırılmaktadır. Dolayısı ile bu dönüştürücülerde çıkış gerilimi giriş geriliminden daima daha düşük seviye olmaktadır. Q-anahtarlama elemanı genellikle “Darbe genişlik modülasyonu(Pulse width modulated-iletimde kaldığı sürenin toplam anahtarlama periyoduna oranına “Modulasyon indeksi” adı verilmektedir[3-4].

$$\lambda = \frac{T_{iletim}}{T_{periyot}} \quad (1)$$

Şekil-2’den görüleceği üzere, Q yarı iletken anahtarının kaynak(Source) terminali direkt olarak giriş geriliminin Nötr ucu ile birleşmemektedir. Bu durum, Q yarı-iletken anahtarını kontrol eden sürücü besleme devresinin nötrünün izole edilmesini gerektirmekte ve dolayısıyla devre yapısını karmaşık hale getirmektedir.



Şekil 2. Düşürücü tip DA-DA dönüştürücü.

Düşürücü tip dönüştürücüde sürekli akım modu (CCM) ve kesintili akım modu (DCM) olmak üzere iki çalışma modu mevcuttur. Çalışma modları belirlenirken, devrede bulunan endüktans üzerindeki akım baz alınmaktadır. Endüktansta biriken enerji bir anahtarlama periyodu içerisinde bitiyor ise DCM, bitmiyor ise CCM modu olarak adlandırılmaktadır. Genel olarak bu çalışmada sürekli akım modu referans alınarak tasarım gerçekleştirilecektir. Şekil-3’de sürekli akım modu için ideal akım ve gerilim dalga şekilleri gösterilmektedir.

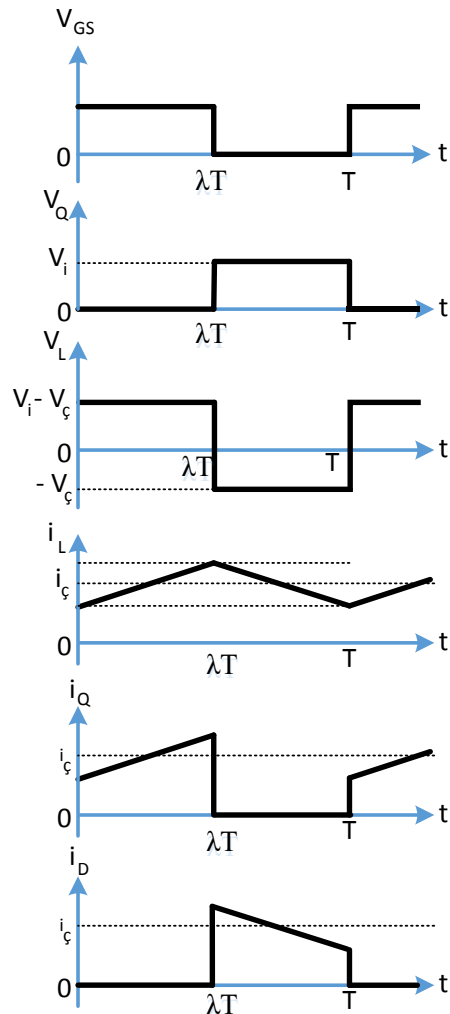
3. Düşürücü DA-DA Dönüştürücü Tasarımı

Düşürücü tip DA-DA dönüştürücü tasarımına başlayabilmek için girdi oluşturan parametreler sırasıyla;

giriş gerilimi aralığı, istenen çıkış gerilimi seviyesi ve bu gerilimdeki dalgalılık oranı, minimum ve maksimum akım seviyesi ve son olarak anahtarlama frekansıdır. Bu belirtilen parametrelerin tasarıma başlanmadan önce belirlenmesi gerekmektedir. Uygulamamızda temel alınan değerler aşağıdaki tabloda verilmektedir.

Tablo 1: Devre tasarımı için girdi olarak belirlenen değerler

Parametre	Değer	Dalgalanma yüzdesi
Giriş gerilimi	200V	%10
Çıkış gerilimi	100V	%5
Çıkış akımı	5-50A(Min-Maks.)	-
Anahtarlama frekansı	50 kHz	-



Şekil 3. Sürekli akım modunda çalışan bir düşürücü tip DA-DA dönüştürücünün ideal akım ve gerilim dalga şekilleri.

3.1. Devre Elemanlarının Belirlenmesi

Bu çalışmada, Prof. Dr. Kazimierzczuk tarafından önerilen yöntem izlenerek düşürücü DA-DA dönüştürücü tasarımı yapılacaktır. Öncelikle minimum, nominal ve maksimum DA gerilim transfer fonksiyonları aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$TF_{DC_{\min}} = \frac{V_o}{V_{giriş_{\max}}} = \frac{100}{220} = 0.454 \quad (2)$$

$$TF_{DC_{nom}} = \frac{V_o}{V_{giriş_{nom}}} = \frac{100}{200} = 0.5 \quad (3)$$

$$TF_{DC_{\max}} = \frac{V_o}{V_{giriş_{\min}}} = \frac{100}{180} = 0.555 \quad (4)$$

Ardından dönüştürücü verimi %85 olarak kabul edilip, minimum, nominal ve maksimum doluluk oranları bulunabilir.

$$\lambda_{\min} = \frac{TF_{\min}}{\eta} = \frac{0.454}{0.85} = 0.534 \quad (5)$$

$$\lambda_{nom} = \frac{TF_{nom}}{\eta} = \frac{0.5}{0.85} = 0.588 \quad (6)$$

$$\lambda_{\max} = \frac{TF_{\max}}{\eta} = \frac{0.555}{0.85} = 0.653 \quad (7)$$

Devrede kullanılacak olan minimum endüktans değeri,

$$L_{\min} = \frac{R_{L_{\max}}(1 - \lambda_{\min})}{2f_s} = 93.5 \mu H \quad (8)$$

Burada RL eşdeğer yük direncini simgelemektedir. Denklemden de görüldüğü üzere, düşük çıkış akımlarında dahi devreyi sürekli akım modunda çalıştırabilmek, endüktansın artmasını gerektirmektedir. Dolayısıyla çıkış akımının minimum değeri devredeki endüktans değerini belirlemekte etkilidir. Bu durumda endüktans üzerindeki maksimum akım dalgalılığı,

$$\Delta i_{L_{\max}} = \frac{V_o(1 - \lambda_{\min})}{Lf_s} = 10 A \quad (9)$$

Devrede çıkış geriliminin belirtilen kriterler arasında salınım yapabilmesi için kondansatör kullanılarak gerilim filtre edilmelidir. Yüzde 5 olarak belirlenen çıkış gerilim dalgalılığı durumunda çıkış gerilim dalgalılık miktarı $V_r=5V$ olarak bulunur.

Kullanılacak olan filtre kondansatörünün maksimum eşdeğer seri direnci için,

$$r_{C_{\max}} = \frac{V_r}{\Delta i_{L_{\max}}} = 0.5 \Omega \quad (10)$$

Minimum kondansatör değeri için ise,

$$C_{\min} = \max \left\{ \frac{\lambda_{\max}}{2f_s r_c}, \frac{1 - \lambda_{\min}}{2f_s r_c} \right\} = 13 \mu F \quad (11)$$

Bu durumda devre çıkışında bulunan LC elemanlarının oluşturduğu alçak geçiren filtrenin köşe frekansı,

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = 4.41 \text{ kHz} \quad (12)$$

Yarı iletken Mosfet, diyot elemanları için gerilim ve akım değerleri,

$$V_{\text{mosfet}} = V_{\text{in(max)}} = 220V = V_D$$

$$I_{\text{Mosfet(max)}} = I_{D(\max)} = I_{\text{ç(max)}} + \Delta i_{L(\max)} / 2 = 55A$$

olarak belirlenmiştir. Tüm devre elemanları Tablo-2’de özetlenmiştir.

Tablo-2: Devre elemanı değerleri

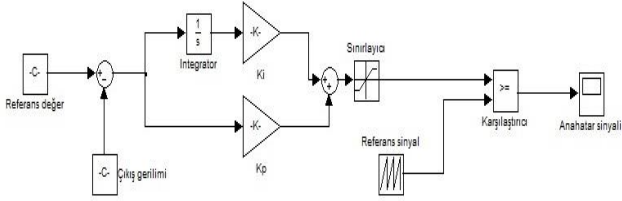
Parametre	Değer
Mosfet	220V/55A
Diyot	220V/55A
Kondansatör	13 μF
Endüktans	93.5 μH

3.2. Kontrolör Tasarımı

Devrenin değişken yük-gerilim seviyelerine karşın sorun çıkarmadan çıkış gerilimini kapalı çevrim kontrol-regüle edebilmesi için gereklidir. Devre basitçe RLC devresi olarak kabul edildiğinde oluşan transfer fonksiyonu,

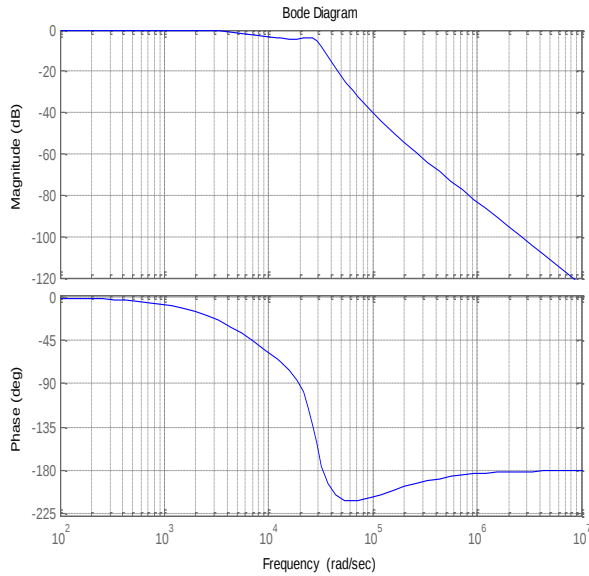
$$G(s) = \frac{1}{LC} \frac{1}{s^2 + \frac{r}{L}s + \frac{1}{LC}} \quad (13)$$

Devrede kontrol edilmesi amaçlanan parametre çıkış gerilimi olduğundan çıkış geriliminin ölçülmesi gerekmektedir. Oldukça yaygın olarak kullanılan kontrolör yapılarından biri olan PI kontrolör, bu çalışmada tercih edilmiştir. PI kontrolörünün yapısı Şekil-3’de verilmiştir.

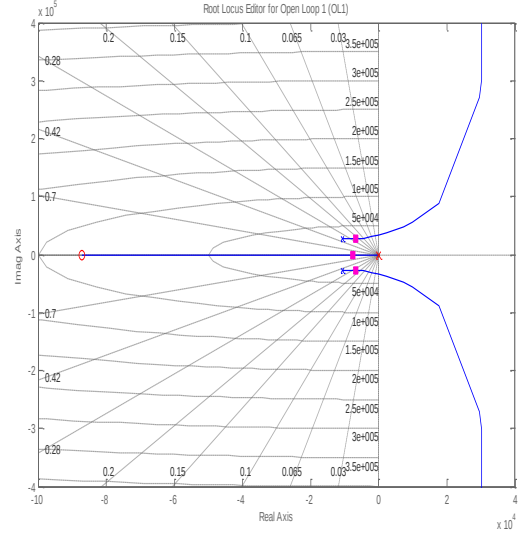


Şekil 4: PI kontrolör yapısı

Şekil-4'den hareketle PI kontrolörün aslında kazanç ve integratör operatörlerinden oluştuğu anlaşılmaktadır[5-7]. Bu çalışmada kazanç ve integratör katsayılarının belirlenmesi amacıyla görsel kullanıcı arayüzü (GUI) ile kontrolör tasarımına imkan sağlayan Matlab-SISOTOOL kullanılmıştır. Matlab-SISOTOOL kontrolör tasarımını otomatik olarak gerçekleştirebilmek için kullanıcıdan sistemin transfer fonksiyonunu girmesine ihtiyaç duymaktadır. Ardından Bode, Root Locus ve Nichols diyagramları ile sistem analiz edilmekte ve kullanıcı ile birlikte PI kontrolör tasarımını interaktif bir şekilde yürütülmesini sağlamaktadır. Düşürücü DA-DA dönüştürücüye ait kapalı çevrim Bode ve Root-Locus diyagramları sırasıyla Şekil-5 ve Şekil-6'de verilmektedir. Kontrolör tasarımı neticesinde belirlenen K_p ve K_i kazanç değerleri Tablo-3'de verilmiştir.



Şekil 5:Kapalı çevrim Bode diyagramı



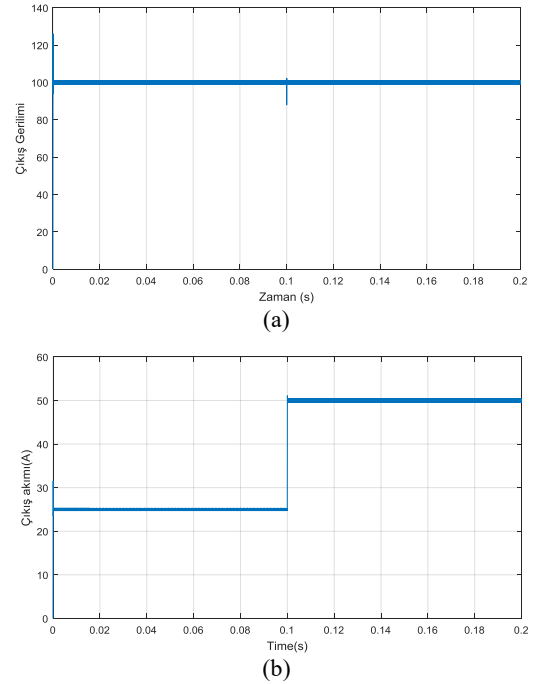
Şekil 6:Kapalı çevrim Root-locus diyagramı

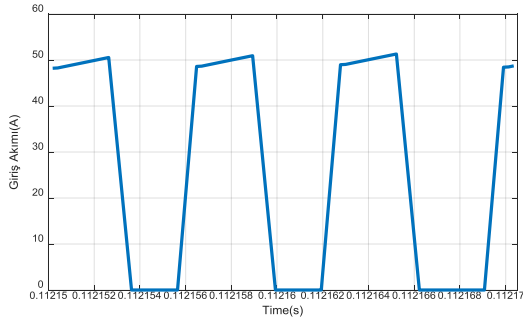
Tablo-3: Kapalı çevrim kontrolör kazanç değerleri

Parametre	Değer
K_p	70
K_i	0.01

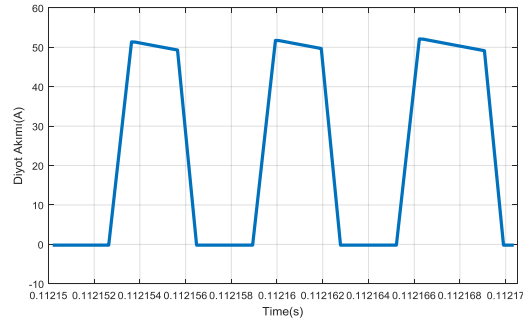
4. Simulasyon Sonuçları

Tasarımı yapılan 100V/50A nominal çıkış gerilim ve akım değerlerine sahip düşürücü DA-DA dönüştürücünün benzetim çalışması Matlab/Simulink ortamında gerçekleştirilmiştir. Benzetim çalışması sonuçları Şekil-7'de verilmektedir. Çıkış yükü olarak R yani direnç kullanılmıştır.

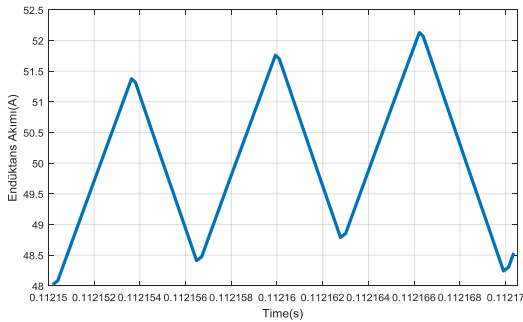




(c)



(d)



(e)

Şekil 7:Düşürücü DA-DA Dönüştürücü kapalı çevrim simülasyon sonuçları; (a) çıkış gerilimi, (b) çıkış akımı, (c) giriş(anahtar) akımı, (d) diyot akımı ve (e) endüktans akımı

Şekil-5’den görüleceği üzere, devrenin çalışmasının ardından kısa bir süre içerisinde çıkışta istenen gerilim seviyesi oluşturulmuştur. $t=0.1$ saniyede çıkış yükü aniden iki katına çıkmış buna rağmen çıkış geriliminin hızlı bir şekilde kontrolör tarafından regüle edilmesi başarılmıştır. Simülasyon sonucu maksimum akımda çıkış gerilimindeki dalgalanma oranı %2.5 olarak bulunmuştur.

5. Yorum ve Öneriler

Bu çalışmada tipik bir düşürücü DA-DA dönüştürücünün tasarım-geliştirme aşamalarından bahsedilmektedir. Okuyucuya genel olarak DA-DA dönüştürücüler hakkında yapılan bilgilendirmeden sonra 5kW çıkış gücü ve 100V/50A çıkış değerlerine sahip

düşürücü DA-DA dönüştürücünün devre tasarımı pratik metotla gerçekleştirilmiş-devre elemanları belirlenmiştir. Ardından düşürücü DA-DA dönüştürücü için kontrolcü tasarımı root-locus yöntemi ile gerçekleştirilmiş ve devrenin benzetim çalışması Matlab-Simulink ortamında yapılmıştır.

6. Kaynaklar

- [1] Hypex Electronics BV - SMPS1200, "http://www.hypex.nl/product/2012-11-23-13-42-14/smeps1200.html"
- [2] Bodur, H. , "Güç Elektroniği", Birsen Yayınevi, 2012
- [3] Kazimierczuk Marian K. "Pulse-Width Modulated DC DC Power Converter", WILEY
- [4] Uran, S., ve Milanovic, M., "Advanced control of buck converter", *IEEE International Conference on Industrial Technology*, 1, 602-607, 2003.
- [5] A. S. Kislovski, R. Redl and N. O. Sokal, "Dynamic Analysis of switching-mode dc-dc converters", 1991, Van Nostrand Reinhold.
- [6] G.W. Wester and R.D. Middlebrook, "Low-Frequency Characterization of Switched dc-dc Converters" *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Volume: AES-9, Issue: 3, May 1973
- [7] B. Arbetter, R. Erickson and D. Maksimovic, "DC-DC converter design for battery-operated systems" *Power Electronics Specialists Conference, 1995. PESC '95 Record., 26th Annual IEEE.*