



Geleneksel Yükseltici DA-DA Dönüştürücü ile İki Fazlı Sarmaşık Yapılı Yükseltici DA-DA Dönüştürücünün Performans Analizi

Performance Analysis of Traditional DC-DC Boost Converter and Two-Phase Interleaved DC-DC Boost Converter

Mustafa Sacid ENDİZ¹

¹Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü
Necmettin Erbakan Üniversitesi
msendiz@erbakan.edu.tr

Özet

Endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan yükseltici DA-DA dönüştürücü devresi, girişine uygulanan doğru gerilimi daha yüksek bir doğru gerilim seviyesine yükselterek çıkışa aktarmaktadır. Yükseltme işlemi dönüştürücü yapısındaki bobinin manyetik alanında depo edilen enerjinin yarı iletken bir anahtar yardımı ile çıkıştaki yüke aktarılması prensibine dayanır. Bu çalışmada geleneksel yükseltici DA-DA dönüştürücü devresi ile iki fazlı sarmaşık yapılı yükseltici DA-DA dönüştürücü devresi aynı şartlar altında Matlab/Simulink ortamında oluşturulan devre modeli üzerinde benzetim çalışmaları yapılarak karşılaştırılmıştır. Dönüştürücü devrelerinin çalışma prensibi ilgili matematiksel ifadeler kullanılarak analiz edilmiştir. Benzetim sonuçlarına göre sarmaşık yapılı yükseltici DA-DA dönüştürücü devresi düşük giriş akım ve çıkış gerilim dalgalılık seviyesi ve daha yüksek anahtarlama frekansı ile öne çıkmaktadır.

Abstract

A boost converter is a DC-DC power converter, which is frequently used in industrial applications, and has a circuit structure that steps up the direct voltage from its input supply to its output. The boosting process is based on the principle of transferring the energy stored in the inductor magnetic field to the output load by using the semiconductor switch. In this study, a traditional DC-DC boost converter and a two-phase interleaved DC-DC boost converter circuits are compared using Matlab/Simulink environment under the same conditions. The operation principle of the converter circuits is presented with a detailed mathematical analysis. According to the simulation results, the two-phase interleaved DC-DC boost converter circuit shows a better performance with reduced input current, output voltage ripples and fast switching frequency.

1. Giriş

DA-DA dönüştürücüler yarı iletken anahtarlama elemanı üretimindeki teknolojik gelişmelere bağlı olarak son yıllarda güç elektroniği uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır [1]. Geleneksel trafolu dönüştürücülere göre çok daha yüksek frekanslarda anahtarlama yapabilmeleri nedeniyle daha hafif ve kompakt yapıya sahip DA-DA dönüştürücüler; endüstriyel

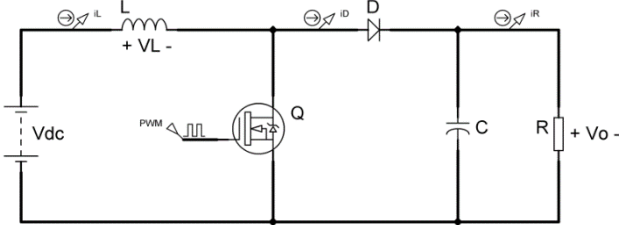
uygulamalarda, solar sistemlerde, elektrikle tahrik edilen araçlarda ve elektrikli birçok ev aletinde güç kaynağı olarak tercih edilmektedir. Girişine uygulanan doğru gerilimi daha yüksek bir doğru gerilim seviyesine yükselterek çıkışa aktaran yükseltici DA-DA dönüştürücü devresinde, yüksek frekanslarda anahtarlama yapabilen bir MOSFET sabit frekanslı bir PWM sinyali uygulanarak sürülmektedir. Çıkış gerilim seviyesi MOSFET'i sürmek için üretilen PWM sinyalinin görev periyodu değiştirilerek ayarlanmaktadır. Sayısal sistemlerin analog sistemlere göre hızlı oluşu, kolay programlanabilmesi ve daha düşük gürültü hassasiyeti gibi avantajlarından dolayı MOSFET için gerekli olan anahtarlama sinyalinin üretildiği kontrol devresini oluşturmak için uygun maliyetli mikrodenetleyiciler kullanılmaktadır. Kontrol katını oluşturan analog ve sayısal arabirimlere sahip mikrodenetleyici devresi, yüksek frekanslı PWM sinyali ile güç katında kullanılan yarı iletken anahtarlama elemanını sürerek istenilen seviyede çıkış geriliminin üretilmesini sağlar [2,3].

Geleneksel yükseltici DA-DA dönüştürücü devreleri yüksek giriş akım ve çıkış gerilim dalgalılık seviyesi nedeniyle yüke istenilen ölçüde tam dalgasız bir doğru gerilim aktaramazlar. Bu durum istenmeyen harmoniklere neden olabilmektedir. Ayrıca devrenin çalışma frekansının pasif devre elemanlarının seçilmesinde belirleyici faktör olması tasarlanan devrenin boyutlarının küçülmesini sınırlamaktadır. Devre boyutlarının büyümesi ise maliyeti arttırmaktadır. Yükseltici DA-DA dönüştürücü devresinin mevcut kısıtlamalarını ortadan kaldırmak amacıyla sarmaşık yapılı yükseltici DA-DA dönüştürücü devresi önerilmiştir. Özellikle büyük güçlü uygulamalarda tercih edilen bu devre yapısı giriş akım ve çıkış gerilim dalgalılık seviyesini önemli ölçüde azaltarak yüke neredeyse dalgasız bir doğru gerilim aktarabilmektedir. Aynı zamanda daha yüksek etkin anahtarlama frekansı sağlanması neticesinde daha küçük boyutlara sahip devre elemanlarının kullanımını mümkün kılmaktadır [4,5].

Bu çalışmada geleneksel yükseltici DA-DA dönüştürücü devresi ile iki fazlı sarmaşık yapılı yükseltici DA-DA dönüştürücü devresi eşit şartlar altında karşılaştırılmıştır. Her iki dönüştürücü yapısının çalışma prensibi, devrede kullanılan elemanların belirlenmesi ile giriş akım ve çıkış gerilim dalgalılık seviyeleri incelenmiştir. Matlab/Simulink ortamında oluşturulan devre modeli üzerinde benzetim çalışmaları yapılmış ve sonuçlar detaylı olarak sunulmuştur.

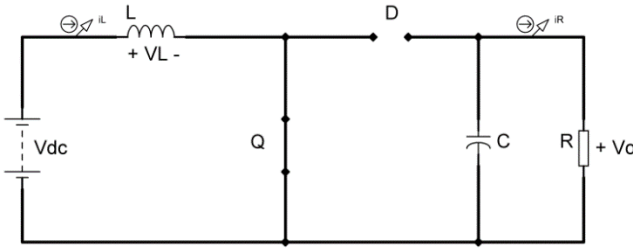
2. Yükseltici DA-DA Dönüştürücü Analizi

Yükseltici DA-DA dönüştürücü devresinin temel devre şeması Şekil-1'de gösterilmiştir. Devrede görüldüğü üzere dönüştürücü devresi manyetik alanda üzerinde enerji depo edebilen bobin, yarı iletken anahtarlama elemanı olarak kullanılan MOSFET ile toparlanma süresi oldukça kısa olan hızlı diyot ve filtre amacıyla kullanılan kondansatörden oluşmaktadır. Yükseltici DA-DA dönüştürücü devresinin çalışması MOSFET anahtarının iletimde ve kesimde olmasına bağlı olarak iki farklı durumda incelenir [5].



Şekil 1: Yükseltici DA-DA dönüştürücü devresi.

Şekil-2'de dönüştürücü devresinde yarı iletken anahtarın iletimde olduğu durum gösterilmiştir. Bu durumda MOSFET iletimde olup diyot ters polariteli olduğu için kesimdedir. Giriş akımı bobin ve yarı iletken anahtar üzerinden geçerek kendisini tamamlar. Giriş kaynağı tarafından beslenen bobin üzerinde enerji depo edilir. Ayrıca enerjilenmiş kondansatör çıkış yükü üzerinden boşalır.



Şekil 2: Yükseltici DA-DA dönüştürücü iletim durumu.

MOSFET anahtarın periyodu T, iletimde ve kesimde olduğu süreler sırasıyla t_{on} ve t_{off} olmak üzere Denklem (1) kullanılarak görev periyodu ΔD hesaplanır.

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

Şekil-1'de verilen devrede V_L bobin gerilimi, V_{dc} dönüştürücü giriş gerilimi, i_L bobin akımı, V_o dönüştürücü çıkış gerilimi ve i_R dönüştürücü çıkış akımı olmak üzere yükseltici DA-DA dönüştürücü devresinin iletimde olduğu süre boyunca ($0 < t_{on} < \Delta DT$) alta verilen denklemler geçerlidir. Anahtarın iletimde olduğu süre ΔDT olarak ifade edilebilir.

$$V_L = V_{dc} \quad (2)$$

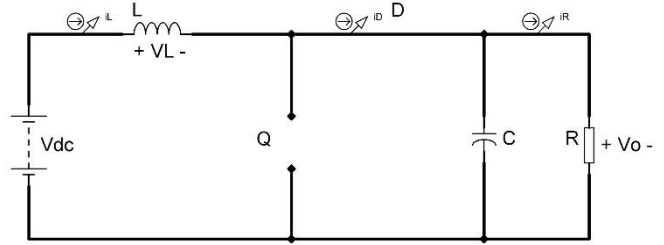
$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_{dc}}{L} \quad (3)$$

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{V_{dc}}{L} \rightarrow \Delta i_L = \frac{V_{dc}}{L} \Delta DT \quad (4)$$

Şekil-3'te dönüştürücü devresinde yarı iletken anahtarın kesimde olduğu durum gösterilmiştir. Anahtar kesime gittiğinde diyot doğru polariteli olup iletime geçecektir. Önceki durumda

enerjilenen bobin giriş kaynağı ile birlikte diyot üzerinden kondansatör ve çıkış yükünü besleyecektir.

Yükseltici DA-DA dönüştürücü devresinin kesimde olduğu süre boyunca ($\Delta DT < t_{off} < T$) aşağıdaki denklemler elde edilir. Anahtarın kesimde olduğu süre $(1-\Delta D)T$ olarak ifade edilebilir.



Şekil 3: Yükseltici DA-DA dönüştürücü kesim durumu.

$$V_L = V_{dc} - V_o \quad (5)$$

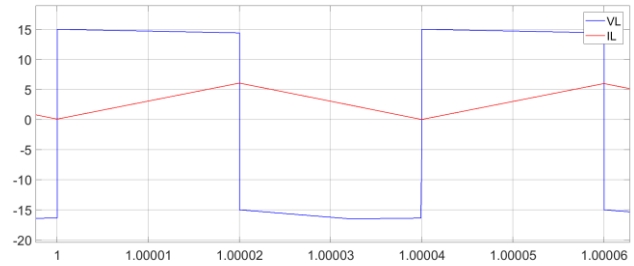
$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_{dc} - V_o}{L} \quad (6)$$

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{V_{dc} - V_o}{L} \rightarrow \Delta i_L = \frac{V_{dc} - V_o}{L} (1 - \Delta D)T \quad (7)$$

Sürekli durum analizinde devrenin kararlı çalışabilmesi için T periyot süresi boyunca bobinin ortalama gerilim değeri sıfır olacaktır veya başka bir ifade ile T periyot süresi boyunca bobin üzerindeki akımın net değişimi sıfırdır. Bu durum Şekil-4'te verilen bobin gerilim ve akım dalga şekillerinde görülmektedir. Denklem (4) ve Denklem (7) kullanılarak alttaki eşitlikler elde edilir. Denklem (9) incelendiğinde dönüştürücü devresinin çıkış gerilim seviyesi ΔD ile doğru orantılı olarak artırılabilir. Görev periyodu daha büyük seçilerek dönüştürücü devresinin çıkış yükü üzerindeki gerilim değeri yükseltilebilir.

$$\frac{V_{dc}}{L} \Delta DT = \frac{V_{dc} - V_o}{L} (1 - \Delta D)T \quad (8)$$

$$\frac{V_o}{V_{dc}} = \frac{1}{1 - \Delta D} \quad (9)$$



Şekil 4: Sürekli durumda V_L ve i_L dalga şekilleri.

Yükseltici DA-DA dönüştürücü devresinin temel çalışma prensibi t_{on} süresi boyunca bobinin manyetik alanında depo edilen enerjinin t_{off} süresince yüke aktarılmasına dayanmaktadır. Yük anahtar iletimdeyken kondansatör üzerinden, anahtar kesime gittiğinde giriş kaynağı ve bobin üzerinden beslenir. Bobinden akım sadece tek yönlü geçebileceğinden dönüştürücü devresinin iletim ve kesim çalışma durumları arasında bobinin uçları arasında indüklenen gerilim iki farklı polaritede olacaktır. PWM yöntemi ile kontrol edilen MOSFET iletimde kesime geçince bobin üzerindeki akım Lenz yasasına göre ani değişimlere tepki

gösterecek ve bobin, giriş kaynağı ile aynı polariteye sahip bir gerilim kaynağı gibi davranacaktır. Ayrıca hızlı diyot elemanı, enerjilenmiş kondansatörün MOSFET üzerinden boşalmasını önler [4,5].

2.1. Bobin ve Kondansatör Değerlerinin Hesaplanması

Bobin ve kondansatör değerleri dönüştürücü devresinin daha kararlı çalışabilmesi için akım ve gerilim dalgalanma değerleri Δi_L ve ΔV_o dikkate alınarak hesaplanmalıdır. Yükseltici DA-DA dönüştürücü devresinde giriş akımı değerinin anahtarlama periyodu boyunca hiçbir zaman sıfıra düşmemesi durumuna sürekli iletim modu denir ve dönüştürücü devresinin yükte dalgasız bir doğru gerilim aktarabilmesi için bu modda çalışması istenir. Sürekli iletim modu için devrede ihtiyaç duyulan minimum bobin ve kondansatör değerleri Denklem (10) ve Denklem (11)'de verildiği gibi hesaplanmaktadır. Hesaplanan değerlerin altında pasif devre elemanı kullanıldığında bobin ve kondansatörden geçen akım değerleri sırasıyla kesim ve iletimde kaldıkları süre boyunca sıfıra düşecek ve dönüştürücü sürekli iletim modundan çıkacaktır [6].

$$L_{min} = \frac{\Delta D(1-\Delta D)^2 R}{2f} \quad (10)$$

$$C_{min} = \frac{\Delta D}{R\Delta V f} \quad (11)$$

2.2. Akım ve Gerilim Dalgalılık Değerlerinin Hesaplanması

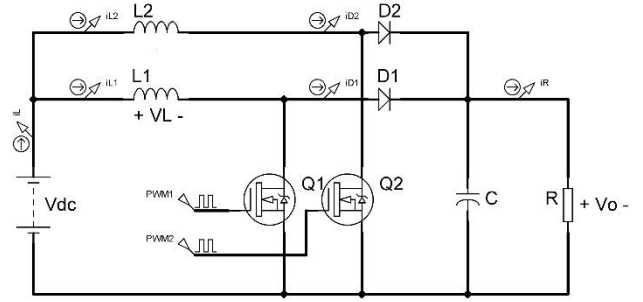
Yükseltici DA-DA dönüştürücüsünün kararlı çalışabilmesi için giriş akım ve çıkış gerilim dalgalılık seviyesinin tasarım aşamasında uygun değerlerde seçilmesi gerekmektedir. Giriş akımı dalgalanması dönüştürücü girişinde kaynaktan veya şebekeden çekilen maksimum ve minimum akım değerlerinin farkına, çıkış gerilim dalgalanması dönüştürücü çıkışında elde edilen maksimum ve minimum gerilim değerlerinin farkına eşittir. Giriş akım ve çıkış gerilim dalgalılık seviyeleri Denklem (12) ve Denklem (13)'te gösterildiği gibi hesaplanmaktadır [6].

$$\Delta i_L = \frac{V_{dc}\Delta D}{fL} \quad (12)$$

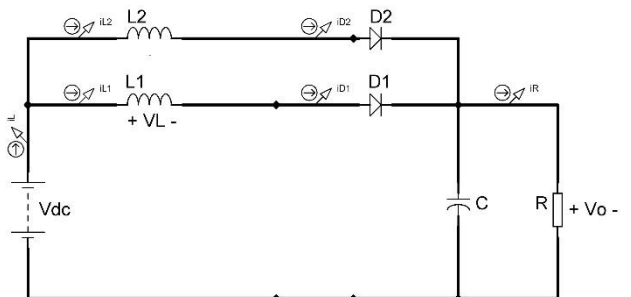
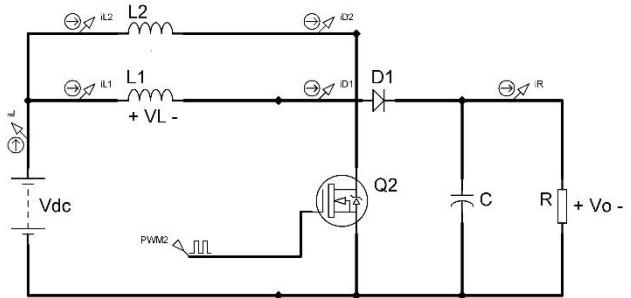
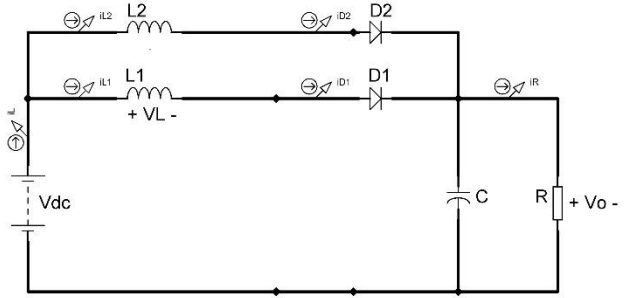
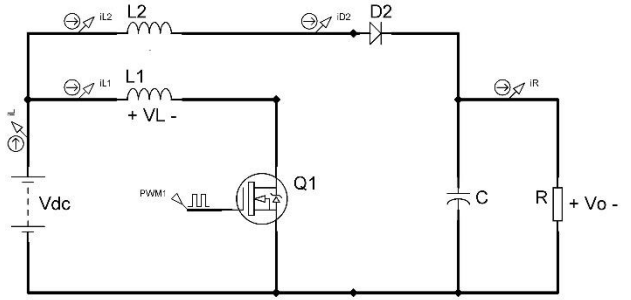
$$\Delta V_o = \frac{I_o\Delta D}{fC} \quad (13)$$

2.3. Sarmaşık Yapılı Yükseltici DA-DA Dönüştürücü

Geleneksel yükseltici DA-DA dönüştürücü devrelerinin mevcut kısıtlamalarını ortadan kaldırmak amacıyla sarmaşık yapılı yükseltici DA-DA devre topolojisi önerilmiştir. Sağlamış olduğu birçok avantaj nedeniyle özellikle büyük güçlü uygulamalarda tercih edilmektedir. Devre yapısının modifiye edilmesi, aynı parametrelere sahip birden fazla dönüştürücü devresinin çok katlı olacak şekilde birleştirilmesiyle sağlanır. Genellikle iki veya üç katlı sarmaşık yapılı devre yapıları faz farklı güç katı çoklanması yöntemi ile tasarlanmaktadır. Bu yöntemde yarı iletken anahtarlama elemanları güç katı sayısına bağlı olarak aralarında faz farkı olacak şekilde sürülür. Bunun sonucunda kaynaktan sürekli akım çekileceğinden giriş akım dalgalılık seviyesi en aza indirgenir. Şekil-5'te iki fazlı sarmaşık yapılı yükseltici DA-DA devresi, Şekil-6'da ise bir anahtarlama periyodu süresince çalışma durumları görülmektedir. Giriş akımı her bir güç katındaki bobin üzerinden geçen akımların toplamına eşittir [7,8].



Şekil 5: İki fazlı sarmaşık yapılı yükseltici DA-DA devresi.



Şekil 6: İki fazlı sarmaşık yapılı yükseltici DA-DA devresinin bir anahtarlama periyodu süresince çalışma durumları.

Sarmaşık yapılu yükseltici DA-DA devresinde giriş akım ve çıkış gerilim dalgalılık seviyeleri Denklem (14) ve Denklem (15) kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$\Delta i_L = \frac{V_o(1-q)\tau}{L(1-\Delta D)} \quad (14)$$

$$\Delta V_o = \frac{V_o q(1-q)}{N^2 f R C(1-\Delta D)} \quad (15)$$

İlgili denklemlerde verilen q giriş akımı doluluk boşluk oranını, τ kaynaktan çekilen giriş akımının dalgalanma periyodunu, τ_{on} ise giriş akımı doluluk oranını göstermektedir. Sarmaşık yapılu yükseltici DA-DA devresi için τ ve q değişkenleri Denklem (16) ve Denklem (17) kullanılarak elde edilmektedir.

$$\tau = \frac{T_s}{N} \quad (16)$$

$$q = \frac{\tau_{on}}{\tau} \quad (17)$$

Denklem (16)'da verilen N sarmaşık yapılu yükseltici DA-DA dönüştürücü devresinin kat sayısını, T_s ise anahtarlama periyodunu göstermektedir.

3. Benzetim Çalışmaları

Geleneksel yükseltici DA-DA dönüştürücü devresi ile iki fazlı sarmaşık yapılu yükseltici DA-DA dönüştürücü devresinin benzetim çalışmaları Matlab/Simulink ortamında Çizelge 1'de verilen parametreler üzerinden yapılmıştır. Her iki dönüştürücü devresi giriş akım ve çıkış gerilim dalgalılık seviyesi değerlerine göre karşılaştırılmıştır.

Çizelge 1: Benzetim çalışması parametreleri

Parametre	Değeri
Giriş Gerilimi	15V
Çıkış Gerilimi	30V
Çıkış Yüğü	20 Ω
Çıkış Gücü	45W
Anahtarlama Frekansı	25kHz
Görev Periyodu	0.5
Maksimum Δi_L	% 10
Maksimum ΔV_o	% 3

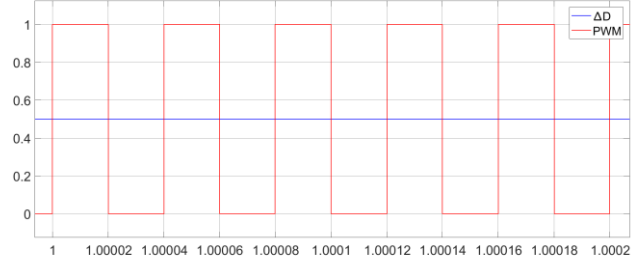
Dönüştürücü devresinin girişine uygulanan 15V'luk gerilim seviyesi çıkışta 30V'a yükseltmek istenmektedir. Çıkış yükü $R=20\Omega$ ve MOSFET anahtarlama frekansı $f=25\text{kHz}$ olarak alınmıştır. Giriş bobinindeki akım dalgalanmasının ortalama giriş akım değerinin %10 ve çıkış kondansatöründeki gerilim dalgalanmasının ortalama çıkış gerilim değerinin %3'ünün altında olması kabul edilerek tasarım aşamasında devrede ihtiyaç duyulan bobin ve kondansatör değerleri ile yükseltme işlemi için gerekli görev periyodu ΔD Denklem (18), Denklem (19) ve Denklem (20) ile hesaplanmaktadır.

$$\frac{V_o}{V_{dc}} = \frac{1}{1-\Delta D} \rightarrow \Delta D = 0.5 \quad (18)$$

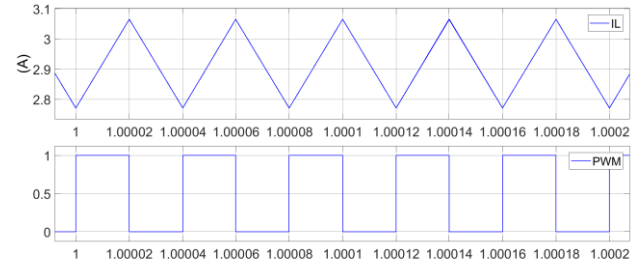
$$L_{min} = \frac{V_{dc}\Delta D}{f\Delta i_L} \rightarrow L_{min} = 3\text{mH} \quad (19)$$

$$C_{min} = \frac{\Delta D}{R\Delta V_o f} \rightarrow C_{min} = 33\mu\text{F} \quad (20)$$

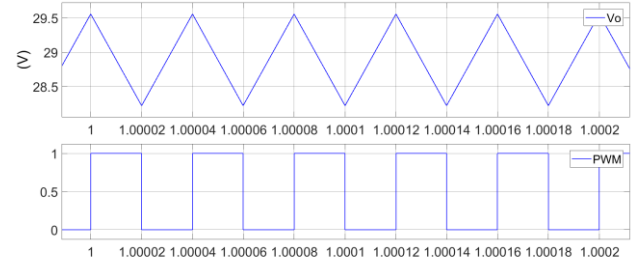
İki fazlı sarmaşık yapılu yükseltici DA-DA dönüştürücü devresinin her bir katında kullanılan bobin, yarı iletken anahtarlama elemanı ve diyot ile çıkış kondansatörü aynı değerlere sahip olacak şekilde seçilmiştir. Benzetim çalışmaları sonucunda giriş akım ve çıkış gerilim dalgalılık seviyesi değerleri ile yarı iletken anahtarlama elemanlarını sürmek amacıyla üretilen PWM sinyalleri ve görev periyodu ΔD 'nin zamana göre değişimleri her iki devre için altta verilen şekillerde sırasıyla gösterilmiştir.



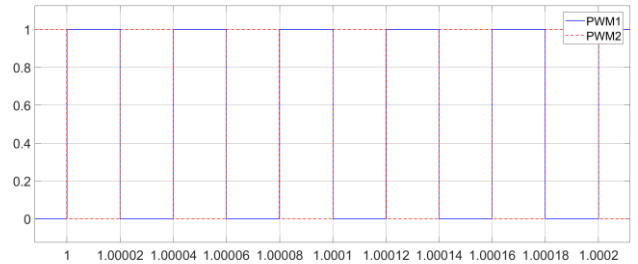
Şekil 7: Geleneksel yükseltici DA-DA için ΔD ve PWM.



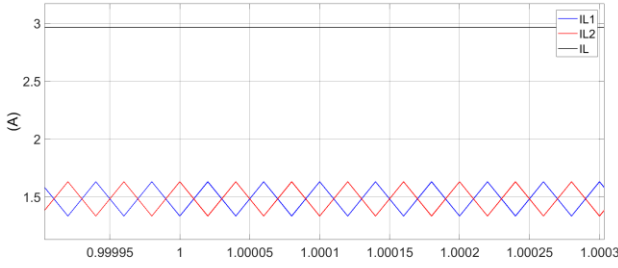
Şekil 8: Geleneksel yükseltici DA-DA için I_L ve PWM.



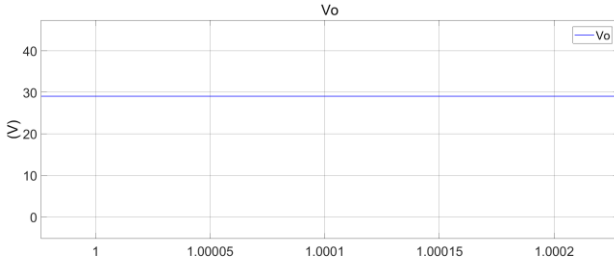
Şekil 9: Geleneksel yükseltici DA-DA için V_o ve PWM.



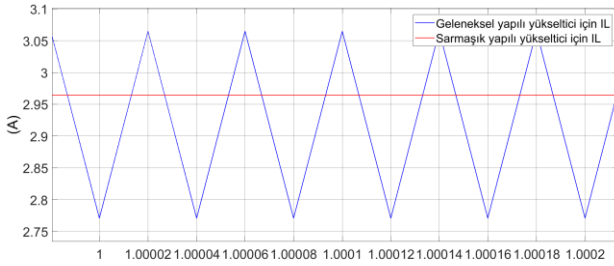
Şekil 10: İki fazlı sarmaşık yapılu yükseltici DA-DA için PWM.



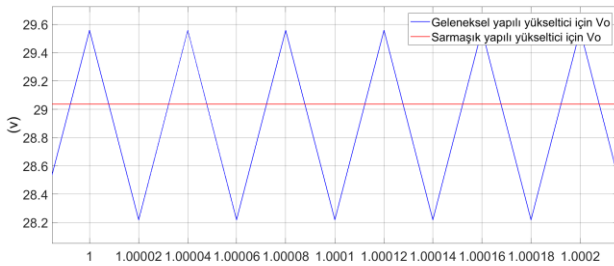
Şekil 11: İki fazlı sarmaşık yapıyla yükseltici DA-DA için I_{L1} , I_{L2} ve I_L .



Şekil 12: İki fazlı sarmaşık yapıyla yükseltici DA-DA için V_o .



Şekil 13: Her iki devrede giriş akımları dalgalanma değişimi.



Şekil 14: Her iki devrede çıkış gerilimleri dalgalanma değişimi.

Benzetim çalışmaları sonucunda geleneksel yükseltici DA-DA için görev periyodu ve PWM sinyalleri ile giriş akım ve çıkış gerilim dalgalılık seviyesi değerleri Şekil-7, Şekil-8 ve Şekil-9'da sırasıyla verilmiştir. Geleneksel yükseltici DA-DA için giriş akım dalgalılık seviyesi yaklaşık 0,28A ve çıkış gerilim dalgalılık seviyesi yaklaşık 2V olarak ölçülmüştür. Tek bir yarı iletken anahtarlama elemanı %50 doluluk oranı ile seçilen frekans değerinde sürülmüştür. Aynı şartlar altında ve zaman aralığında iki fazlı sarmaşık yapıyla yükseltici DA-DA devresi için PWM sinyalleri ile giriş akım ve çıkış gerilim dalgalılık seviyesi değerleri Şekil-10, Şekil-11 ve Şekil-12'de sırasıyla gösterilmiştir. Giriş akım dalgalılık seviyesi 0.001A, çıkış gerilim

dalgalılık seviyesi 0.005V değerlerinin altında ölçülmüştür. Güç katında kullanılan iki adet yarı iletken anahtarlama elemanı aralarında 180° derece faz farkı olacak şekilde sürülmüştür. Bu nedenle iki fazlı sarmaşık yapıyla yükseltici DA-DA devresinde etkin anahtarlama frekansı, geleneksel yükseltici DA-DA dönüştürücü devresinin etkin anahtarlama frekansının iki katına eşittir. Şekil-13 ve Şekil-14'te her iki yükseltici DA-DA devresinin giriş akım ve çıkış gerilim dalgalılık seviyesi değişimi karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Görüldüğü üzere iki fazlı sarmaşık yapıyla yükseltici DA-DA devresi çok daha az dalgalanma değerlerine sahiptir.

4. Sonuçlar

Çok katlı sarmaşık yapıyla yükseltici DA-DA dönüştürücüsünün temel çalışma prensibi kullanılan kat sayısına göre yarı iletken anahtarlama elemanlarının faz farkıyla sürülmesine dayanır. Bu çalışmada geleneksel yükseltici DA-DA dönüştürücü devresi ile iki fazlı sarmaşık yapıyla yükseltici DA-DA dönüştürücü devresi eşit şartlar altında Matlab/Simulink ortamında oluşturulan devre modeli üzerinde giriş akım ve çıkış gerilim dalgalılık seviyesi değerleri bakımından karşılaştırılmıştır. Geleneksel yükseltici DA-DA devrelerine kıyasla giriş kaynağından sürekli akım çekmesinden dolayı iki fazlı sarmaşık yapıyla yükseltici DA-DA devresi oldukça düşük giriş akım ve çıkış gerilim dalgalılık seviyelerine sahiptir. Ayrıca yarı iletken anahtarlama elemanının kat sayısına bağlı şekilde paralellenenek kullanılmasından dolayı dönüştürücü devresinin etkin çalışma frekansı artacağından yükte dalgasız bir doğru gerilim sağlanmaktadır. Devrenin etkin anahtarlama frekansının artması daha düşük nominal değerlerde bobin ve kondansatör elemanlarının kullanımını mümkün kılmaktadır.

5. Kaynaklar

- [1] Chen, S., Zhou, L., Luo, Q., Gao, W., Wei, Y., Sun, P. and Du, X., "Research on topology of the high step-up boost converter with coupled inductor", IEEE Transactions on Power Electronics, 34(11), 10733-10745, 2019.
- [2] Hasaneen, B. M. and Mohammed, A. A. E., "Design and simulation of DC/DC boost converter," 12th International Middle-East Power System Conference, 2008, 335-340.
- [3] Çoruh, N., Erfidan, T., ve Ürgün S., "DA DA Boost Tipi Dönüştürücü Tasarımı ve Gerçeklenmesi", Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu (ELECO), 2008, 362-365.
- [4] Ravi, D., Letha, S. S., Samuel, P. and Reddy, B. M., "An overview of various DC-DC converter techniques used for fuel cell based applications", International Conference on Power Energy, Environment and Intelligent Control (PEEIC), 2018, 16-21.
- [5] Hu, X., Ma, P., Wang, J. and Tan, G., "A hybrid cascaded DC-DC boost converter with ripple reduction and large conversion ratio", IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 8(1), 761-770, 2019.
- [6] Ayop, R. and Tan, C. W., "Design of boost converter based on maximum power point resistance for photovoltaic applications", Solar Energy, 160, 322-335, 2018.
- [7] Nahar, S. and Uddin, M. B., "Analysis the performance of interleaved boost converter", In 2018 4th International Conference on Electrical Engineering and Information & Communication Technology (ICEEICT), 2018, 547-551.
- [8] Reddy, D. S., "Review on power electronic boost converters", Australian Journal of Electrical and Electronics Engineering, 18(3), 127-137, 2021.