



Düşük Güçlü Elektrikli Araç Sistemleri İçin Temel ZVT Yükseltici Devresi Simülasyonu

Basic ZVT Boost Converter Simulation for Low Power Electric Vehicle Systems

Muhammed Şamil ERGİN¹, Erdem AKBOY²

¹Elektrik Mühendisliği
Yıldız Teknik Üniversitesi
samilergin5@gmail.com

²Elektrik Mühendisliği
Yıldız Teknik Üniversitesi
eakboy@yildiz.edu.tr

Özet

Son yıllarda elektrikli araçların popülerliğinin artmasıyla birlikte yüksek verimli ve yüksek güç yoğunluğuna sahip Da-Da Dönüştürücülere ihtiyaç artmaktadır. Bu ihtiyacı karşılamak üzere kontrol kolaylığı, basit yapısı ve yüksek güç yoğunluğu gibi imkanları sebebiyle darbe genişlik modülasyonlu yükseltici da da dönüştürücüler elektrikli araç uygulamalarında yaygın bir şekilde kullanılır hale gelmiştir. Boyutlarının küçülmesi ve artan güç talebinin karşılanması için darbe genişlik modülasyonlu da da dönüştürücülerde güç yoğunluğunu arttıracak çalışmalar gerçekleştirilmektedir. Daha yüksek güç yoğunluğu için çalışma frekansı artırılan çalışmalarda anahtarlama kayıpları, elektro manyetik girişim (emg, emi) gibi sorunlar ortaya çıkmaktadır. Bu sorunların önüne geçebilmek için yumuşak anahtarlama tekniği uygulanan bir yükseltici Darbe Genişlik Modülasyonlu (DGM) Da-Da Dönüştürücü tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan yükseltici dönüştürücü bara gerilimini çevre birimlerin çalışması için gereken gerilim değerlerine dönüştürecektir.

Abstract

With the increasing popularity of electric vehicles in recent years, the need for high efficiency and high power density dc dc converters has also increased. In order to meet this need, amplifier pwm dc dc converters are frequently used in the vehicle for reasons such as high power operation and ease of control. In order to reduce their size and meet the increasing power demand, studies are carried out to increase the power density in pwm dc dc converters. Problems such as switching losses and emi arise when the operating frequency is increased for higher power density. In order to avoid these problems, a boost dc dc design with soft switching technique has been realized in this study. The designed boost dc dc converter will convert the busbar voltage to the voltage values required for the operation of the peripherals.

1. Giriş

Yüksek güç yoğunluğu, hızlı geçiş cevabı ve kontrol kolaylığı nedeniyle, Darbe Genişlik Modülasyonlu (DGM) Da-Da Dönüştürücüler, endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Daha yüksek güç yoğunluğu ve daha hızlı geçiş cevabı, anahtarlama frekansı artırılarak elde edilebilir. Ancak, anahtarlama frekansı

arttıkça, anahtarlama kayıpları ve elektromanyetik girişim (EMI) gürültüsü de artar. Bu nedenle, bastırma hücreleri denilen yapılar vasıtasıyla anahtarlama kayıpları azaltılarak, anahtarlama frekansı yükseltilebilir [1,2].

Yumuşak anahtarlama, anahtarlama esnasında, elemanın maruz kaldığı akım ve gerilim değerleri ile akım ve gerilim yükselme hızlarının bastırılması, akım ve gerilim değişimlerinin şekillendirilmesi, anahtarlama kayıpları ile EMI gürültünün azaltılması ve anahtarlama enerjisinin yüke veya kaynağa transfer edilmesi durumlarını kapsar. Literatürde, RC/RCD, kutuplu/kutupsuz, rezonanslı/rezonansız ve aktif/pasif gibi çok farklı türde sunulmuş bastırma hücresi mevcuttur. Modern yumuşak anahtarlama bastırma hücrelerinde ise anahtarlama kayıpları tamamen sıfırlanır [3,4,6,7].

Bastırma hücresindeki yardımcı yarıiletken elemanların sayısının artması hem dönüştürücü maliyetini artırır hem de uygulama güçlüğü oluşturur [8-9]. Bazı bastırma hücreleri ise sadece özel da-da dönüştürücü topolojilerine uygulanabilir ve temel da-da dönüştürücülere uygulanamaz [10,11].

Dönüştürücülerde anahtarlama elemanı olarak mosfet kullanıldığında, iletme girme esnasında parazitik kondansatörünün deşarjından dolayı meydana gelen kayıplar anahtarlama kayıplarının büyük bir kısmını teşkil etmektedir. Mosfetler yüksek güçlü dönüştürücülerde kullanıldığında, iletim durumundaki iç direncinden dolayı iletim güç kayıpları yüksek olmaktadır [5].

2. Yumuşak Anahtarlama

Darbe Genişlik Modülasyonlu (DGM) Da-Da Dönüştürücülerde frekans değerinin artırılmasıyla birlikte ortaya çıkan sorunların çözülmesi ancak yumuşak anahtarlama metodlarının uygulanmasıyla mümkündür. Bu sorunları ortadan kaldırmak için Sıfır Gerilimde Anahtarlama (ZVS), Sıfır Akımda Anahtarlama (ZCS), Sıfır Gerilimde Geçiş (ZVT) ve Sıfır Akımda Geçiş (ZCT) teknikleri geliştirilmiştir.

2.1. Yumuşak Anahtarlama Teknikleri

Yumuşak anahtarlama teknikleri genel olarak

- Sıfır Gerilimde Anahtarlama (ZVS)
- Sıfır Akımda Anahtarlama (ZCS)
- Sıfır Gerilimde Geçiş (ZVT)
- Sıfır Akımda Geçiş (ZCT)

şeklinde dört grup altında incelenmektedir.

2.1.1. Sıfır Gerilimde Anahtarlama

Sıfır Gerilimde Anahtarlama (ZVS) tekniği güç anahtarlarının kesime girmesi esnasında anahtarlama kayıplarını azaltmak için uygulanan bir yumuşak anahtarlama tekniğidir. Bu teknikle güç anahtarına paralel küçük değerli bir kondansatör bağlanır. Anahtarın kesime girmesi esnasında kondansatör sayesinde gerilimin yükselme hızı azaltılır. Anahtarlama kaybı bu şekilde azaltılmış olup anahtarlama enerjisi kondansatöre aktarılmıştır. Modern hücrelerde kondansatöre aktarılan enerji rezonans hücreleriyle geri kazanılırken pasif devrelerde bu enerji bir direnç üzerinde harcanmaktadır. Bu teknikle bastırma elemanı olarak kullanılan kondansatör güç anahtarı üzerinde ilave akım stresi oluşturmaktadır.

2.1.2. Sıfır Akımda Anahtarlama

Sıfır Akımda Anahtarlama (ZCS) tekniği anahtarın iletme girmesi esnasında uygulanan bir yumuşak anahtarlama tekniğidir. Bu teknikle güç anahtarına seri küçük değerli bir endüktans bağlanmaktadır. Anahtarın iletme girmesi esnasında endüktans sayesinde akımın yükselme hızı azaltılmaktadır. Anahtarlama kaybı bu şekilde azaltılmış ve anahtarlama enerjisi endüktansa aktarılmaktadır. Modern hücrelerde endüktansa aktarılan enerji rezonans hücreleriyle geri kazanılırken pasif devrelerde bu enerji bir direnç üzerinde harcanmaktadır. Bu teknikle bastırma elemanı olarak kullanılan endüktans güç anahtarı üzerinde ilave gerilim stresi oluşturmaktadır.

2.1.3. Sıfır Gerilimde Geçiş

Sıfır Gerilimde Geçiş (ZVT) tekniği güç anahtarının sıfır gerilim altında iletme girmesi için uygulanan ileri bir yumuşak anahtarlama tekniğidir. Bu teknikle ilave olarak kullanılan rezonans devresi sayesinde anahtar üzerindeki gerilim sıfır değerine düşürülür. Gerilimin sıfır olduğu esnada anahtarın kapısına uygulanan sinyal ile birlikte iletme girme sıfır kayıp altında gerçekleşmektedir. Teknik, yardımcı anahtar gerektiğinden aktif, anahtarlama enerjisi geri kazanıldığından modern bir yöntemdir. Güç anahtarlarının parazitik kondansatörlerine ait enerjinin geri kazanılması tekniğin sık kullanılmasına neden olmaktadır.

2.1.4. Sıfır Akımda Geçiş

Sıfır Akımda Geçiş (ZCT) tekniği anahtarın yumuşak iletme girmesi için uygulanan ileri bir yumuşak anahtarlama tekniğidir. Sıfır akımda geçiş tekniğinde rezonans devreleriyle birlikte anahtar üzerindeki akım bir süreliğine sıfır değerine düşürülmektedir. Bu esnada anahtarın kapısına uygulanan kontrol sinyali kesilmektedir. Anahtarın sıfır akım altında kesime girmesiyle birlikte, anahtarlama enerjisi kaybı tamamen yok edilmektedir.

2.2. Temel Yükseltici Devre Analizi

Temel yükseltici devre yarı iletken bir anahtar, diyot, bobin ve kondansatörden oluşur. Devrenin tasarımı girişe uygulanan gerilim değerini yükselterek çıkış gerilimi elde etmek üzere

gerçekleştirilmiştir. Devre analizi anahtarın iletimde olduğu ve kesimde olduğu durum olarak iki aralık altında incelenmektedir.

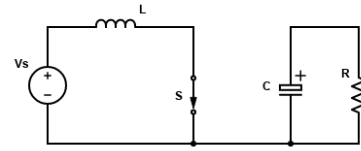
2.2.1. Aralık 1 [$t_0 < t < t_1$]

Temel yükseltici devrede birinci aralık Şekil 1’de gösterildiği gibi güç anahtarının iletimde olduğu aralıktır. Giriş katında bulunan gerilim kaynağı tarafından endüktans enerjilenmektedir. Bu aralıkta endüktansın akımı ve enerjisi artmaktadır. Anahtarın iletimde olduğu süre boyunca yük çıkış katında bulunan kondansatör tarafından beslenecektir. Aralığın sonunda anahtarın kontrol sinyali kesilmekte, anahtar sinyalinin kesilmesiyle birlikte aralık sona ermektedir.

$$L \frac{di_L}{dt} = v_S(t) \quad (1)$$

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{V_i}{L} \quad (2)$$

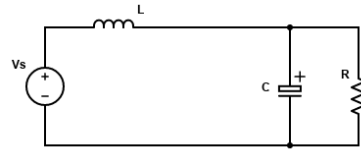
$$\Delta I_L = \frac{V_S}{L} (DT) \quad (3)$$



Şekil 1: Anahtarın iletim durumu.

2.2.2. Aralık 2 [$t_1 < t < t_2$]

İkinci aralık Şekil 2’de gösterildiği gibi güç anahtarının kontrol sinyalinin kesilmesiyle başlamaktadır. Endüktansın ürettiği elektro manyetik kuvvet ile diyot iletme girmektedir. Bu aralık boyunca giriş kaynağı ve endüktans ile birlikte yük beslenmektedir. Aralık boyunca endüktans enerjisi sıfıra inerse bu moda Kesintili Çalışma Modu (DCM), enerji sıfırlanmadan güç anahtarı iletme girer ve aralık sonlanırsa Sürekli Çalışma Modu (CCM) denir.



Şekil 2: Anahtarın kesim durumu.

$$v_L = V_S - V_o \quad (4)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_S - V_o}{L} \quad (5)$$

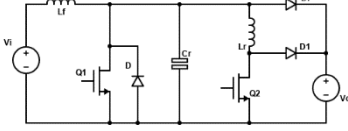
$$\Delta I_L = \frac{V_S - V_o}{L} (1 - D)T \quad (6)$$

$$\frac{V_S}{L} \times DT + \frac{V_S - V_o}{L} (1 - D)T = 0 \quad (7)$$

$$V_o = \frac{V_S}{1 - D} \quad (8)$$

2.3. Temel Yükseltici ZVT Devre Analizi

Temel yükseltici ZVT devreye ait devre yapısı Şekil 3'de gösterilmektedir. Temel yükseltici devreye göre ilave yardımcı anahtar, kondansatör, endüktans ve diyot içermektedir. İlave kondansatör ve endüktans elemanları aynı zamanda bastırma hücreleri elemanlarıdır. Temel yükseltici sıfır gerilim geçişli devreye ait analiz yedi aralık altında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3: Temel yükseltici ZVT devre şeması.

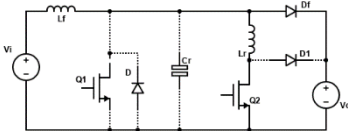
2.3.1. Aralık 1 [$t_0 < t < t_1$]

Birinci aralığa ait devre yapısı Şekil 4'de gösterilmektedir. Aralığın başlangıcında yardımcı anahtara sinyal uygulanmasıyla aralık başlamaktadır. Yardımcı anahtar bastırma endüktansı sayesinde ZCS tekniği ile iletme girmektedir. L_r akımı lineer olarak artmaya başlamaktadır. Ana akım tamamen L_r üzerinden geçtiğinde D_f diyodunun akımı sıfırlanacaktır. Diyodun kesime girmesiyle aralık sona ermektedir.

$$i_{Lr} = i_{S1} = \frac{V_o}{L_r}(t - t_0) \quad (9)$$

$$i_{DF} = I_i - i_{Lr} = I_i - \frac{V_o}{L_r}(t - t_0) \quad (10)$$

$$t_{01} = \frac{I_i}{V_o} L_r \quad (11)$$



Şekil 4: Birinci aralığa ait devre şeması.

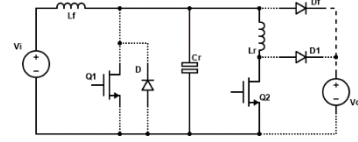
2.3.2. Aralık 2 [$t_1 < t < t_2$]

Şekil 5'te gösterildiği gibi D_f diyodunun kesime girmesiyle ikinci aralık başlamaktadır. Bu aralıkta C_r ve L_r arasında rezonans gerçekleşmektedir. Aralık boyunca C_r 'de depolanmış olan enerji rezonans ile endüktansa aktarılmaktadır. C_r bu aralıkta tamamen deşarj olur. Aralık güç anahtarının paralel diyodunun iletme girmesiyle sona ermiştir. D diyodu C_r nedeniyle ZVS tekniği ile iletme girmektedir.

$$i_{Lr} = i_{S1} = \frac{V_o}{Z} \sin \omega(t - t_1) + I_i \quad (12)$$

$$V_{Cr} = V_s = V_o \cos \omega(t - t_1) \quad (13)$$

$$t_{12} = \frac{\pi}{2} \sqrt{L_r C_r} \quad (14)$$



Şekil 5: İkinci aralığa ait devre şeması.

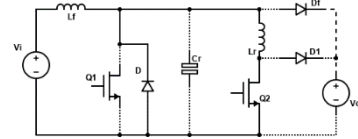
2.3.3. Aralık 3 [$t_2 < t < t_3$]

Üçüncü çalışma aralığına ait devre yapısı Şekil 6'da verilmiştir. Güç anahtarına ait paralel diyodun iletme girmesiyle aralık başlamaktadır. Bu aralığın ortalarında ana anahtar iletme girmektedir. Bu yöntemle ana anahtar sıfır gerilim altında iletme girmiş olur. Aralığın sonunda yardımcı anahtarın kontrol sinyali kesilmektedir. Yardımcı anahtar sert kesime girerken D_1 diyodu ise sert iletme girer ve aralık tamamlanır. Bu aralık aynı zamanda ZVT aralığı olarak da adlandırılmaktadır.

$$i_{Lr} = i_{S1} = I_{Lrmax} \quad (15)$$

$$i_S = i_D = I_i - I_{Lrmax} \quad (16)$$

$$T_D \geq t_{01} + t_{12} = \frac{I_i}{V_o} L_r + \frac{\pi}{2} \sqrt{L_r C_r} \quad (17)$$



Şekil 6: Üçüncü aralığa ait devre şeması.

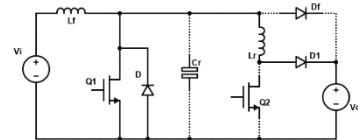
2.3.4. Aralık 4 [$t_3 < t < t_4$]

D_1 diyodunun iletme girmesiyle aralık başlamaktadır. Şekil 7'de verilen aralıkta endüktansta depolanan enerji D_1 diyodu üzerinden yüke aktarılmaktadır. Böylelikle anahtarlama enerjisi geri kazanılmaktadır. L_r sayesinde D_1 diyodu ZCS ile kesime girer. Enerji tamamen yüke aktarıldıktan sonra aralığın sonuna gelinir.

$$i_{Lr} = I_{Lrmax} - \frac{V_o}{L_r}(t - t_3) \quad (18)$$

$$i_S = I_i - i_{Lr} = I_i - I_{Lrmax} + \frac{V_o}{L_r}(t - t_3) \quad (19)$$

$$t_{34} = \frac{I_{Lrmax}}{V_o} L_r \quad (20)$$

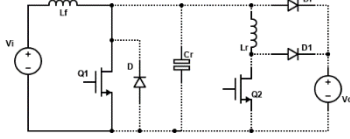


Şekil 7: Dördüncü aralığa ait devre şeması.

2.3.5. Aralık 5 [$t_4 < t < t_5$]

Beşinci aralık dönüştürücünün normal iletim aralığıdır. Aralığın eşdeğeri Şekil 8'de verildiği gibi temel yükseltici devrede anahtarın iletime olduğu aralıkla benzerdir. Aralığın süresine darbe süresi de denilmektedir. Aralık boyunca giriş endüktansının enerjisi artmaktadır. İstenen çıkış gerilimi değerine göre aralığın süresi kontrol edilir.

$$t_{45} = f(\gamma) \quad (21)$$



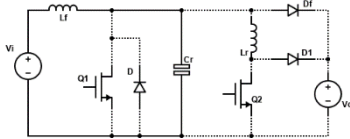
Şekil 8: Beşinci aralığa ait devre şeması.

2.3.6. Aralık 6 [$t_5 < t < t_6$]

Şekil 9'da verilen aralık ana anahtarın kontrol sinyalinin kesilmesiyle birlikte başlar. Bu aralıkta Cr kondansatörü şarj olmaktadır. Güç anahtarın, anahtarlama enerjisi Cr kapasitesine aktarılmaktadır. Anahtar Cr nedeniyle ZVS tekniğiyle kesime girmektedir. Cr'nin tamamen şarj olması ve Dr'nin iletime girmesiyle aralığın sonuna gelinir.

$$V_{Cr} = \frac{I_i}{C_r} (t - t_5) \quad (22)$$

$$t_{56} = \frac{V_o}{I_i} C_r \quad (23)$$

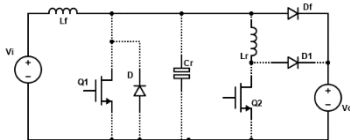


Şekil 9: Altıncı aralığa ait devre şeması.

2.3.7. Aralık 7 [$t_6 < t < t_7$]

Dr diyodunun iletime girmesiyle birlikte aralık başlar. Çıkış yükü, güç kaynağı ve endüktans tarafından beslenir. Endüktans akımı ve enerjisi bu aralıkta azalır. Yardımcı anahtara tekrar kontrol sinyali verilmesiyle aralığın sonuna gelinir. Bu aralığın süresi çıkış geriliminin değerine göre değişmektedir.

$$t_{67} = f(1 - \gamma) \quad (24)$$



Şekil 10: Yedinci aralığa ait devre şeması.

2.4. Temel Yükseltici ve ZVT Yükseltici Devre Tasarımı

Elektrikli hava araçlarında (drone) çevre birimlerin ihtiyacı olan gerilim seviyelerini sağlamak için yükseltici devre tasarımı gerçekleştirilecektir. Tasarlanan yükseltici devre

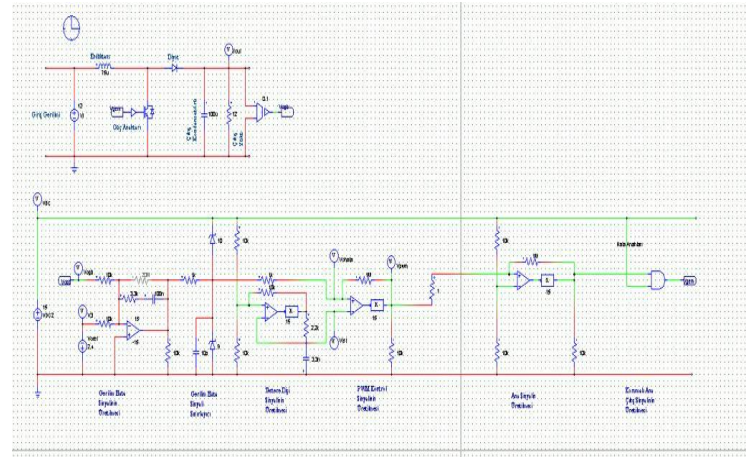
elektrikli hava aracının ana barasından beslenecektir. Aynı değerlerde temel yükseltici devre tasarımı da gerçekleştirilmiş, iki devre arasında karşılaştırma yapılmıştır. Simülasyon çalışmaları PowerSim (PSIM) uygulamasında gerçekleştirilmiştir. Devrelerin analizleri bildiride çıkarılan denklemler üzerinden gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 1: Devre Parametreleri

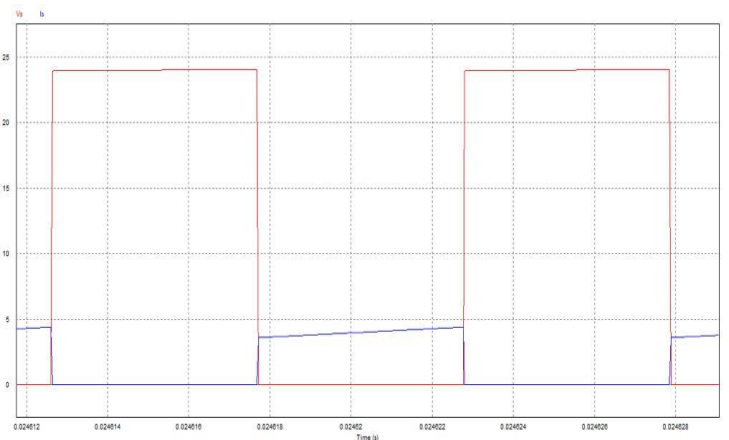
Parametre ve sembol	Değer ve birim
Giriş Gerilimi	12-18 V
Çıkış Gerilimi	24
Çıkış Gücü	48 W
Anahtarlama Frekansı	100 kHz
Giriş Endüktansı	75 uH
Bastırma Endüktansı	3 uH
Bastırma Kondansatörü	10 nF

2.4.1. Temel Yükseltici Devre Simülasyon Çalışması

Temel yükseltici devrenin simülasyon çalışması Şekil 10'da verilmiştir. Güç anahtarının kontrolü çıkış katından alınan gerilim örneğinin karşılaştırılması ile sağlanmaktadır. Kontrol analog şekilde gerçekleştirilmiştir. Güç anahtarı iletime ve kesime girerken sert anahtarlama yapılmaktadır. Şekil 11'de anahtarlama esnasında akım ve gerilimin davranışları verilmiştir.



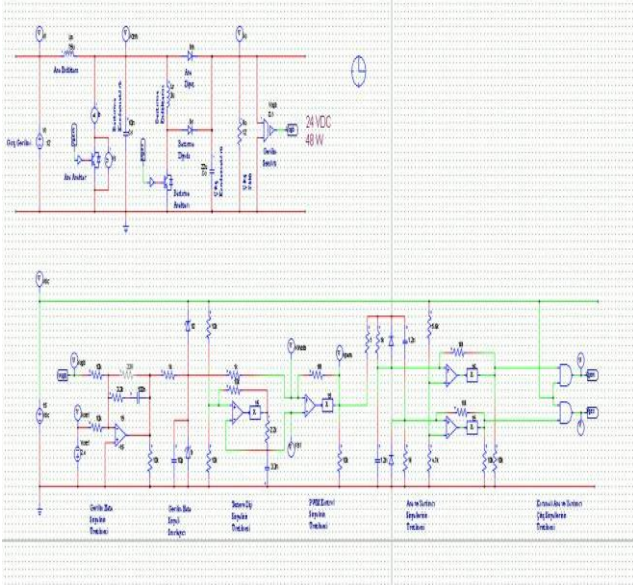
Şekil 10: Yükseltici devreye ait simülasyon çalışması



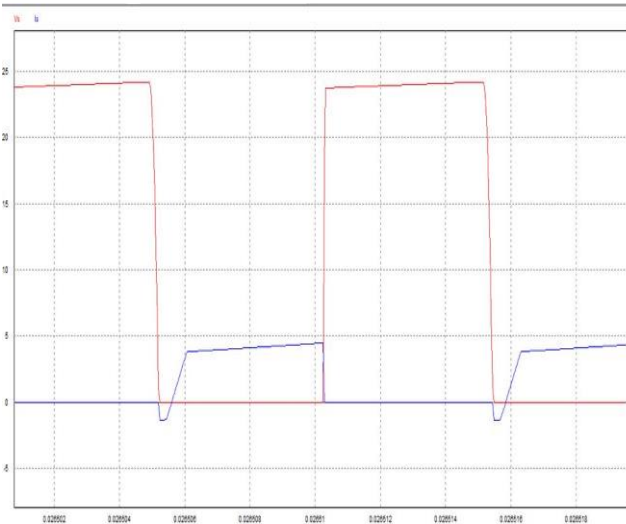
Şekil 11: Güç anahtarına ait akım gerilim grafiği

2.4.2. Temel Yükseltici ZVT Devre Simülasyon Çalışması

Temel ZVT yükseltici devresine ait simülasyon çalışması Şekil 12’de verilmiştir. Simülasyon Çizelge 1’de verilen değerler ile oluşturulmuştur. Çıkış mertebesinde alınan gerilim örneği bir referans gerilimiyle karşılaştırılarak ana anahtarın doluluk oranı ayarlanmıştır. Denklem 3 ve 6 ‘da yapılan işlemlerle yardımcı anahtarın iletimde kalması gereken süre belirlenmiştir. Bu süre kontrol devresi üzerinden ayarlanmaktadır. Şekil 13’de yumuşak anahtarlama gerçekleştirilen (ZVT) bir güç anahtarına ait akım gerilim grafiği verilmiştir. Güç anahtarının iletime girmeden önce üzerindeki gerilim sıfıra düşmüştür. Anahtar iletime girerken sıfır gerilim altında girmiştir. Bu teknikte iletime girerken sıfır kayıplı anahtarlama gerçekleştirilmiştir.



Şekil 12: ZVT Yükseltici devresine ait simülasyon çalışması



Şekil 13: Güç anahtarının akım gerilim grafiği

3. Sonuçlar

Bu çalışmada aynı giriş ve çıkış gerilimlerinde, aynı güçlerde iki devre karşılaştırılmıştır. İlk devre temel yükseltici devre, ikinci devre ise temel ZVT yükseltici devredir. İkinci devrede güç anahtarı iletime girerken yumuşak anahtarlama tekniği olan ZVT gerçekleştirilmiş, anahtar kesime girerken ZVS tekniği ile kesime girmiştir. Modern bir yumuşak anahtarlama tekniği olan ZVT tekniği ile anahtarın iletime girme anahtarlama kayıpları geri kazanılmıştır. Yumuşak anahtarlama tekniklerinin uygulandığı devrenin veriminin daha yüksek olduğu görülmüştür. Anahtarlama kayıpları azaltılan ZVT yükseltici devrede yüksek frekanslara çıkma fırsatı bulunmuştur. Frekans yükseldikçe devrenin güç yoğunluğu artmıştır.

4. Kaynaklar

- [1] Ferraro, A., "An Overview of Low-Loss Snubber Technology for Transistor Converters", IEEE Power Electron. Spec. Conf., 1982, 466-477.
- [2] Kim, T.W., Kim H.S., Ahn H.W., "An Improved ZVT PWM Boost Converter", Power Electron. Spec. Conf., PESC00, 31st, vol.2, 2000, 615-619..
- [3] Bodur, H. ve Bakan, A.F., "A New ZVT-PWM DC-DC Converter", IEEE Trans. On Power Electron., 2002, 40-47.
- [4] Ferraro, A., "An Overview Of Low-Loss Snubber Technology For Transistor Converters", IEEE Power Electron.Spec.Conf., 1982, 466-477.
- [5] Hua, G., Leu, C.S., Jiang, Y. Ve Lee, F.C.Y., "Novel Zero-Voltage-Transition PWM Converters", IEEE Trans. On Power Electron. vol9, 1994, 213-219.
- [6] Ting N. S., Sahin Y. And Aksoy I., " Analysis, design and implementation of a zero-voltage-transition interleaved boost converter", "Journal of Power Electronics, 10(2): 251-260, 2017.
- [7] Sahin Y., Ting N.S. and Aksoy I., "A highly efficient zvt-zct pwm boost converter with direct power transfer", Electrical Engineering, doi:10.1007/s00202-017-0546-y.
- [8] Mohammadi M., Adib E. and Farzanehfard H., "Passive lossless snubber for double-ended flyback converter", IET Power Electronics, 8(1): 56-62, (2015).
- [9] Do H. L., "A soft-switching DC/DC converter with high voltage gain," IEEE Transactions on Power Electronics, 25(5): 1193-1200, (2010).
- [10] Chen Z., Zhou Q. and Xu J. "Novel family of PWM soft-single-switched DC-DC converters with coupled inductors", IET Power Electronics, 8(2): 245- 250, (2014).
- [11] Mohammadi M., Adib E. and Yazdani M. R., "Family of soft-switching single-switch PWM converters with lossless passive snubber", IEEE Transactions on Industrial Electroics, 62(6): 3473-3481, (2015)