

# Geliştirilmiş ZCZVT-PWM DC-DC Yükseltici Dönüştürücü

Yakup ŞAHİN<sup>1</sup>, İsmail AKSOY<sup>2</sup>, Naim Süleyman TING<sup>3\*</sup>

\*Yıldız Teknik Üniversitesi/Elektrik Mühendisliği

<sup>1</sup>yahin@yildiz.edu.tr, <sup>2</sup>iaksoy@yildiz.edu.tr, <sup>3</sup>nsting@yildiz.edu.tr

**Özet**—Bu çalışmada ZCZVT PWM DC-DC dönüştürücülere uygulanmak üzere geliştirilmiş aktif bir bastırma hücresi sunulmuştur. Geliştirilmiş bastırma hücresi ana anahtar için iletme girmede Sıfır Gerilimde Geçiş (ZVT) ve kesime girmede ise Sıfır Akımda Geçiş (ZCT) sağlar. Bastırma hücresi, geniş hat gerilimi ve yük gerilimi değişimlerinde EMI gürültülerini azaltır ve yumuşak anahtarlama sağlar. Aynı zamanda dönüştürücüdeki tüm yarıiletken elemanlar yumuşak anahtarlama ile çalışır. Ana elemanlarda akım ya da gerilim stresi oluşmaz. Geliştirilmiş bastırma hücresi düşük bir maliyete ve basit bir yapıya sahiptir. Dönüştürücünün teorik analizleri ile beraber çalışma aralıkları da detaylarda verilmiştir. Dönüştürücünün 500 W ve 100 kHz değerlerinde hazırlanan prototipi için deneysel veriler verilmiştir. Teorik yaklaşım ve deneysel sonuçların birbiriyle tam olarak uyduğu gözlemlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler**—ZVT, ZCT, DC-DC Dönüştürücüler, Yumuşak Anahtarlama.

## 1- Giriş

Harika dinamik performansı, basitliği, ucuzluğu ve kontrol kolaylığı dolayısıyla PWM DC-DC dönüştürücüler endüstride geniş ölçekte kullanılmaktadır [1]. PWM DC-DC dönüştürücülerde güç yoğunluğunu arttırmak ve maliyeti düşürmek için yüksek frekanslarda anahtarlama yapılmalıdır. Çünkü yüksek frekanslara çıkıldıkça endüktans, kondansatör ve transformatör boyutları ciddi oranda küçülmektedir. Fakat anahtarlama frekansı arttıkça anahtarlama kayıpları ve elektromanyetik girişim (EMI) artmaktadır. Bu olumsuzluklar ise dönüştürücünün toplam verimi ve çalışma performansını düşürmektedir. Anahtarlama kayıplarının üstesinden gelebilmek için sıfır gerilimde anahtarlama (ZVS) ve sıfır akımda anahtarlama (ZCS) teknikleri geliştirilmiştir.

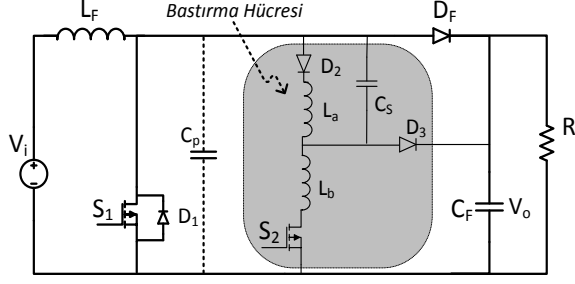
Sıfır gerilimde geçiş (ZVT) ile anahtarlama sağlayan ilk dönüştürücüde ana anahtar kesimdeyken, aktif bir bastırma hücresi yardımıyla önce ana anahtarın gerilimi sıfıra düşürülür ve daha sonra anahtar gerilimi sıfırda tutuluyorken iletim sinyali verilir [2]. Böylece ana anahtar ZVS yumuşak anahtarlama (YA) ile iletme girmiş olur. Ayrıca bu dönüştürücüde ana diyot ZCS ile kesime girerken yardımcı anahtar ZCS ile iletme girer. Fakat bu dönüştürücüde ana anahtarın kesime girmesi yeterince iyi değildir. Bununla beraber yardımcı anahtarın kesime girmesi de sert anahtarlama(SA) şeklinde gerçekleşir. Bu sorunların üstesinden gelebilmek için birçok çalışma yapılmıştır [3-6].

Sıfır akımda geçiş (ZCT) ile anahtarlama sağlayan ilk dönüştürücüde kesime girme işlemi sırasında, aktif bir bastırma hücresi yardımıyla önce ana anahtarın içinden geçen akım sıfır seviyesine düşürülür [7]. Anahtar akımı sıfırda tutuluyorken anahtarın iletim sinyali kesilir ve anahtar YA ile kesime girmiş olur. Bu dönüştürücüde ana diyot yumuşak anahtarlama ile iletme girerken yardımcı anahtar ZCS ile iletme girer. Fakat ana anahtarın iletme girmesi ve ana diyotun kesime girmesi SA ile gerçekleşir. Ayrıca yardımcı anahtarın kesime girmesi de SA altında gerçekleşir. Son olarak, ana diyotta oluşan ters toparlanma akımları büyük kayıplara neden olur. ZCT tekniğinde ortaya çıkan bu olumsuzlukların üstesinden gelebilmek için birçok çalışma yapılmıştır [8-11].

ZVT tekniğinde iletme girme esnasında kayıpsız bir anahtarlama gerçekleştirilirken ZCT tekniğinde kesime girme esnasında kayıpsız bir anahtarlama gerçekleştirilir. Bu tekniklerdeki olumsuzlukları ortadan kaldırmak için birçok çalışma yapılmıştır. Yalnız, bu çalışmalarda sert anahtarlama, yüksek EMI, akım veya gerilim stresleri gibi birçok olumsuzluk bulunmaktadır. Ortaya çıkan tüm bu olumsuzlukları ortadan kaldırmak için en iyi çözüm ZVT ve ZCT tekniklerini bir tek hücrede bir araya getirmektir. ZVT ve ZCT tekniklerini birleştirme (ZCZVT) konusunda bazı çalışmalar mevcuttur [12-14].

[6]'da ZVT tekniğinin dezavantajlarını aşmak için yeni bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada ana anahtar ZVT ile iletme girmektedir. Ayrıca ana diyot ZCS ile kesime girerken yardımcı anahtar ZCS ile iletme ve kesime girmektedir. Dönüştürücüde yardımcı anahtardaki makul akım stresi dışında hiçbir elemanda akım ya da gerilim stresi oluşmamaktadır. Fakat bu dönüştürücüde ana anahtarın kesime girmesi YA ile olmamaktadır. Bu çalışmada, kesime girme işlemi esnasında ortaya çıkan kayıplar, dönüştürücünün toplam verimini düşürdüğü gibi ısınma problemine de yol açmaktadır.

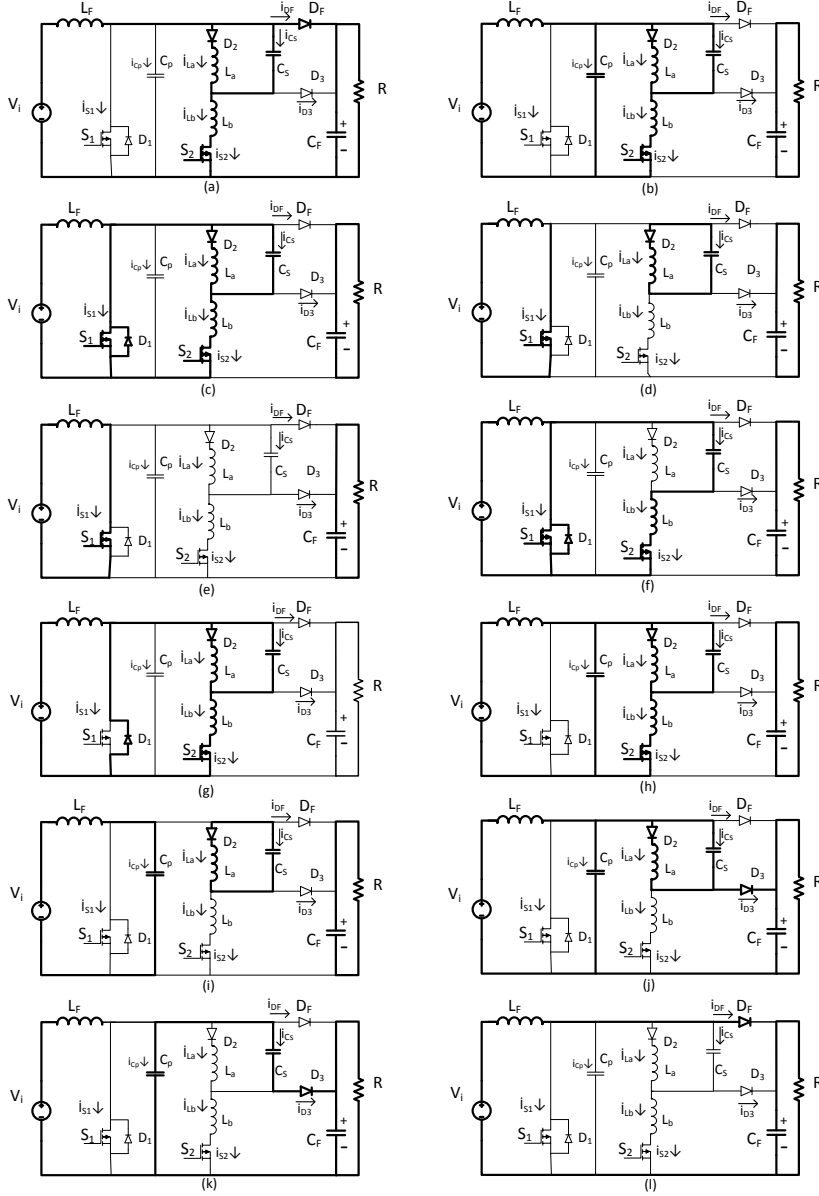
Bu çalışmada [6]'da ortaya çıkan olumsuzlukların üstesinden gelebilmek için yeni bir kontrol yöntemi sunulmuştur. Kontrol yöntemi değiştirilen dönüştürücüde iletme girme aşamasında ZVT tekniğiyle anahtarlama ve kesime girme aşamasında ZCT ile anahtarlama gerçekleştirilerek ZCZVT çalışma sağlanmıştır. Bu şekilde dönüştürücüdeki olumsuzlukların önüne geçilerek dönüştürücünün toplam verimi artırılmıştır. Sunulan dönüştürücü Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1 Sunulan ZCZVT PWM DC-DC dönüştürücü

## 2- Dönüştürücü Çalışma Aralıkları

Dönüştürücünün bir periyot çalışmasında toplam on iki aralık bulunmaktadır. Bu aralıklara dair eşdeğer devreler Şekil 2’de verilmiştir. Dalga şekilleri ise Şekil 3’te verilmiştir. Teorik analizi kolaylaştırmak için tüm yarıiletken elemanlar ideal kabul edilmiştir.



Şekil 2 Çalışma aralıklarına ait eşdeğer devre şekilleri

### Aralık 1 ( $t_0 < t < t_1$ ) [a]

$t=t_0$  anında  $S_2$  yardımcı anahtarının iletim sinyali verilmesiyle bu aralık.  $S_2$  yardımcı anahtarının akımı artarken  $D_F$  ana diyotunun akımı azalır.  $t=t_1$  anında  $L_b$  alt bastırma endüktansının akımı giriş akımı seviyesine ulaştığında ana diyotun akımı sıfır

seviyesine düşer ve aralık sona erer.  $S_2$  yardımcı anahtarı seri bağlı  $L_a$  ve  $L_b$  endüktanslarından dolayı ZCS ile iletme girerken  $D_F$  ana diyotu rezonanstan dolayı ZCS ile kesime girer.

### Aralık 2 ( $t_1 < t < t_2$ ) [b]

$t=t_1$  anında  $D_F$  ana diyotunun kesime girmesiyle başlayan bu aralıkta parazitik kondansatör  $C_p$  ile bastırma hücresi arasında  $C_p-L_a-L_b-C_s$  yollu yeni bir rezonans başlar.  $C_p$  kondansatörü tüm enerjisini bastırma hücresine aktardığında  $V_{Cp} = 0$  olur ve  $S_1$  ana anahtarının dahili diyotu  $D_1$  iletime girer.  $t=t_2$  anında  $D_1$  diyotunun iletime girmesiyle bu aralık sona erer.

### Aralık 3 ( $t_2 < t < t_4$ ) [c]

$t=t_2$  anında  $D_1$  diyotunun iletime girmesiyle başlayan bu aralıkta bastırma hücresindeki  $L_a-L_b-C_s$  yollu rezonans devam eder. Bu esnada  $D_1$  diyotu giriş akımının üstündeki akımı geçirir.  $D_1$  diyotunun iletimde olduğu bu aralığa ZVT aralığı denir ve bu aralığın ortalarında  $S_1$  ana anahtarının iletim sinyali verilir. Böylece ana anahtar ZVT ile kayıpsız bir şekilde iletime girer.  $L_b$  alt bastırma endüktansının akımı azalır  $t=t_3$  anında giriş akımı seviyesine düştüğünde  $D_1$  diyotu kesime girer.  $D_1$  diyotunun kesime girmesiyle ana anahtar akımı artmaya başlar ve  $L_b$  endüktansının akımı azalmaya devam eder.  $t=t_4$  anında ana anahtar akımı giriş seviyesine ulaşınca alt bastırma endüktansın akımı sifıra seviyesine düşer ve bu aralık sona erer.

### Aralık 4 ( $t_4 < t < t_5$ ) [d]

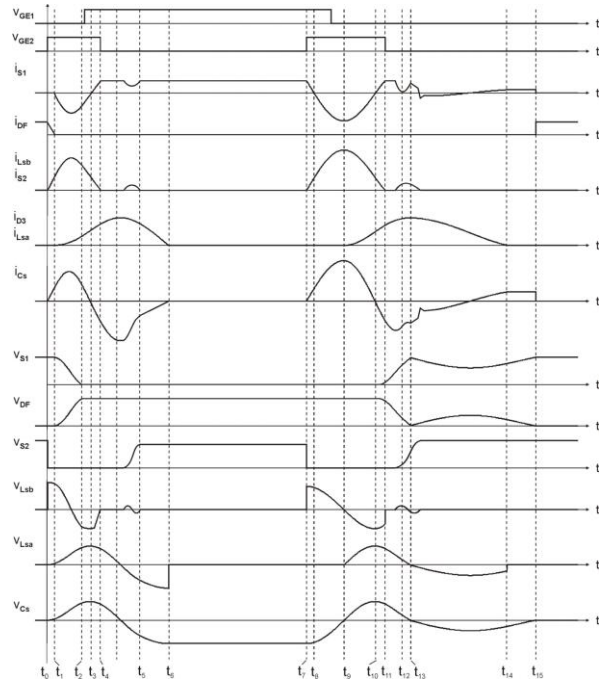
$t=t_4$  anında  $S_1$  ana anahtarı akımının giriş akımı seviyesine ulaşmasıyla bu aralık başlar.  $S_2$  yardımcı anahtarının akımı ZCS ile sıfır düştüğü için bu aralıkta  $S_2$  anahtarının iletim sinyali kesilir.  $L_a$  üst bastırma endüktansında biriken enerji ise  $L_a-D_3-C_s$  yollu rezonans ile  $C_s$  kondansatörüne aktarılır.  $t=t_5$  anında  $C_s$  kondansatörünün geriliminin maksimum seviyeye ulaşmasıyla bu aralık sona erer.

### Aralık 5 ( $t_5 < t < t_6$ ) [e]

Aralık boyunca  $S_1$  ana anahtarı giriş akımını geçirir. Klasik PWM iletim aralığı.

### Aralık 6 ( $t_6 < t < t_8$ ) [f]

$t=t_6$  anında  $S_2$  yardımcı anahtarının iletim sinyalinin verilmesiyle bu aralık başlar.  $L_b$  endüktansının akımı artarken  $S_1$  ana anahtarının akımı azalmaya başlar.  $t=t_7$  anında  $L_b$  bastırma endüktansının akımı giriş akımı seviyesine ulaşınca ana anahtarın akımı sifıra düşer ve  $D_1$  diyotu iletime girer.  $D_1$  diyotunun giriş akımının üstünde kalan akımı geçirdiği bu aralığa ZCT aralığı denir ve bu aralığın ortalarında ana anahtarının iletim sinyali kesilir. Böylece  $S_1$  ana anahtarı ZCT ile kayıpsız bir şekilde kesime girer.  $t=t_8$  anında  $C_s$  kondansatörünün geriliminin sifıra düşmesiyle  $L_b$  endüktansının akımı maksimum seviyeye ulaşır ve aralık sona erer.



Şekil 3 Eşdeğer devrelere ait dalga şekilleri

### Aralık 7 ( $t_8 < t < t_9$ ) [g]

$t=t_8$  anında  $C_s$  bastırma kondansatörünün geriliminin pozitif olmaya başlamasıyla birlikte  $D_2$  diyotu iletime girer ve  $L_a-L_b-C_s-S_2-D_1$  yollu bir rezonans başlar.  $t=t_9$  anında  $L_b$  endüktansının akımının giriş akımı seviyesine düşmesiyle  $D_1$  diyotu kesime girer ve aralık sona erer.

### Aralık 8 ( $t_9 < t < t_{10}$ ) [h]

$t=t_9$  anında  $D_1$  diyotunun kesime girmesiyle başlayan bu aralıkta sabit giriş akımı altında  $C_p-L_a-L_b-C_s$  yollu yeni bir rezonans oluşur. Aralık boyunca  $L_b$  alt bastırma endüktansının akımı azalır ve  $t=t_{10}$  da sıfır seviyesine düşer.  $S_2$  yardımcı anahtarından geçen akım sıfır seviyesine düşünce bu anahtarın iletim sinyali kesilir. Böylece yardımcı anahtar ZCS ile kesime girmesiyle bu aralık sona erer.

### Aralık 9 ( $t_{10} < t < t_{11}$ ) [i]

$t=t_{10}$  da  $S_2$  yardımcı anahtarının kesime girmesiyle başlayan bu aralıkta iki kapalı devre oluşur.  $C_p$  parazitik kondansatörü sabit giriş akımı ile lineer bir şekilde şarj olurken  $L_a$  bastırma endüktansında biriken enerji  $C_s$  kondansatörüne aktarılır.  $t=t_{11}$  de  $C_p$  kondansatörü gerilimi ile  $C_s$  kondansatörü gerilimleri toplamı çıkış gerilimine şarj olunca bu aralık sona erer.

### Aralık 10 ( $t_{11} < t < t_{12}$ ) [j]

$t=t_{11}$  anında  $D_3$  diyotunun iletime girmesiyle başlayan bu aralıkta sabit giriş akımı altında  $C_p-L_a-C_s$  yollu bir rezonans oluşur.  $L_a$  bastırma endüktansındaki enerjinin

tamamı  $t=t_{12}$  anında  $C_s$  kondansatörü ve çıkışa aktarılınca aralık sona erer.

### Aralık 11 ( $t_{12}<t<t_{13}$ ) [k]

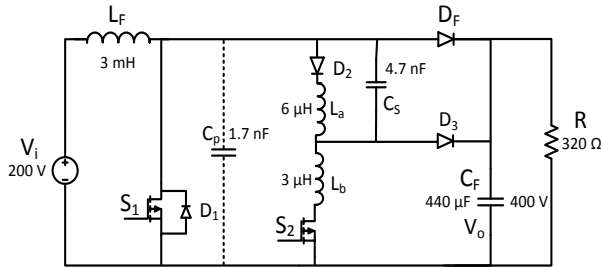
$t=t_{12}$  anında  $L_a$  bastırma endüktansının akımının sıfır seviyesine düşmesiyle başlayan bu aralıkta  $C_p$  parazitik kondansatörü sabit giriş akımı altında lineer bir şekilde şarj olurken  $C_s$  bastırma kondansatörü lineer bir şekilde deşarj olur.  $t=t_{13}$  anında  $C_p$  kondansatörü gerilimi çıkış gerilimi seviyesine ulaşınca  $C_s$  kondansatörü gerilimi sıfır seviyesine düşer ve  $D_F$  ana diyotu iletme girer.  $D_F$  diyotunun iletme girmesiyle bu aralık sona erer.

### Aralık 12 ( $t_{13}<t<t_{14}=t_0$ ) [l]

$t=t_{14}$  anında  $D_F$  ana diyotunun iletme girmesiyle başlayan bu aralıkta giriş akımı  $D_F$  üzerinden çıkışa aktarılır. Bu aralık klasik PWM kesim aralığıdır. Böylece başlangıç koşullarına dönmüş olur. Bir sonraki periyotta anlatılan aralıklar tekrar eder.

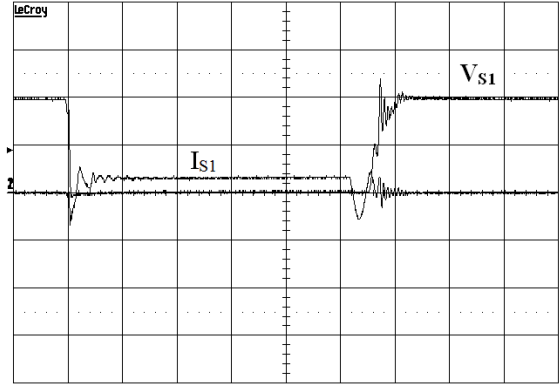
## 3- Deneysel Sonuçlar

Sunulan ZCZVT PWM DC-DC dönüştürücünün laboratuvar ortamında 500 W gücünde ve 100 kHz anahtarlama frekansında bir prototipi yapılarak deneysel veriler elde edilmiştir. Yapılan prototipin eşdeğer devresi Şekil 4'te gösterilmiştir.

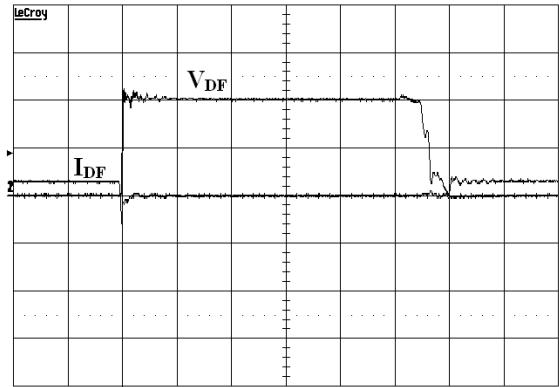


Şekil 4 Prototip 500 W ve 100 kHz için deneysel devre

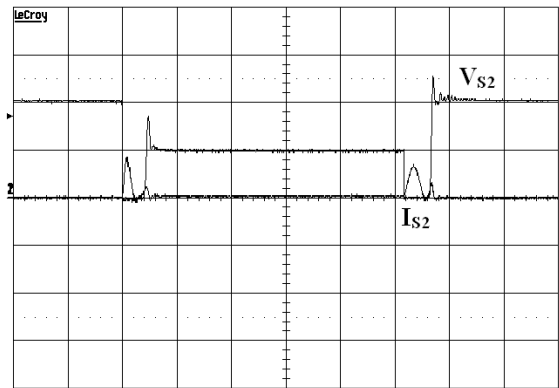
Şekil 5'teki dalga şekillerinden, ana anahtarın ZVT ile iletme girdiği ve ZCT ile kesime girdiği görülebilir. Ayrıca ana anahtarda ilave akım ve gerilim stresi oluşmamaktadır. Şekil 6'da ise ana diyotun ZCS ile kesime girdiği ve ZVS ile iletme girdiği görülmektedir. Benzer şekilde ana diyotta da akım yada gerilim stresi oluşmamaktadır. Son olarak Şekil 7'de yardımcı anahtara ait dalga şekillerinden bu anahtarın ZCS ile iletme ve kesime girdiği görülmektedir. Ayrıca yardımcı anahtarda gerilim stresi bulunmamaktadır.



Şekil 5 Deneysel sonuçlarda ana anahtarın akımı ve gerilimi. 200 V/kare, 10 A/kare ve 1 µs/kare değerlerinde



Şekil 6 Deneysel sonuçlarda ana diyotun akımı ve gerilimi. 200 V/kare, 10 A/kare ve 1 µs/kare değerlerinde



Şekil 7 Deneysel sonuçlar yardımcı anahtarın akımı ve gerilimi. 200 V/kare, 10 A/kare ve 1 µs/kare değerlerinde

## 4- Sonuç

Bu çalışmada aktif bastırma hücresine sahip geliştirilmiş ZCZVT PWM DC-DC yükseltici bir dönüştürücü sunulmuştur. Dönüştürücü kendisinden önceki ZVT ve ZCT dönüştürücülerin istenilen özelliklerini taşıırken bu dönüştürücülerin dezavantajlarının ise üstesinden gelmektedir. Sunulan dönüştürücüdeki bastırma hücresi periyodun çok küçük bir kısmında çalışarak ana anahtarın kayıpsız

bir şekilde ZVT ile iletme ve ZCT ile kesime girmesini sağlamaktadır. Ayrıca ana diyotun ZCS ile kesime girmesini ve ZVS ile iletme girmesini sağlamakta ve diyotun ters toparlanma kayıplarını minimize etmektedir. Bastıma hücresi yumuşak anahtarlama sağlarken ana elemanlarda hiçbir akım ya da gerilim stresi oluşturmamaktadır.

## Kaynaklar

- 1- H. Bodur, A. F. Bakan "A New ZVT-PWM DC-DC Converter" 2002, Power elect.
- 2- Hua, Lea, Jiang, Lee "Novel Zero-Voltage-Transition PWM Converters" Power elect. 1994
- 3- Park, Yu, Jung "Analysis and Design of a Soft-Switching Boost Converter With an HI-Bridge Auxiliary Resonant Circuit" Power Elect. 2010.
- 4- Jain Praven "A Zero Voltage Transition Boost Converter Employing a Soft Switching Auxiliary Circuit With Reduced Conduction Losses" Power Electr. 2004
- 5- Gurunathan "A Zero-Voltage Transition Boost Converter Using a Zero-Voltage Switching Auxiliary Circuit" Power Elec. 2002
- 6- Moschopoulos "Novel dual auxiliary circuits for ZVT-PWM converter" Can. Journal of Elec. Comp. Eng. 2008
- 7- Hua, Yang, Jiang, Lee "Novel Zero-Current-Transition PWM Converters" Power Elect. 1994
- 8- Bodur, Bakan "An Improved ZCT-PWM DC-DC Converter for High-Power and Frequency Applications" Ind. Elect. 2004
- 9- Adib, Fazenahfard "Family of Zero-Current Transition PWM Converters" Ind. Elec. 2008
- 10- Das, Moschopoulos "A Comparative Study of Zero-Current-Transition PWM Converters" Ind. Elect. 2007
- 11- Lee "New Zero-Current-Transition PWM DC/DC Converters Without Current Stress" Power Elect. 2003
- 12- Bodur, Bakan "A New ZVT-ZCT-PWM DC-DC Converter" Power Electr. 2004
- 13- Akin, Bodur "A New Single-Phase Soft-Switching Power Factor Correction Converter" Power Elect. 2011
- 14- Helio Hey "A True ZCZVT Commutation Cell for PWM Converters" power elect. 2000