

## DC-DC Dönüştürücülerde Kullanılan Yumuşak Anahtarlama Yöntemlerinin Karşılaştırılması

### The Comparison of Methods Used in Soft Switching DC-DC Converters

Yakup ŞAHİN<sup>1</sup>, İsmail AKSOY<sup>1</sup>, N. Süleyman TINGİ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Elektrik Elektronik Fakültesi – Elektrik Mühendisliği Bölümü  
Yıldız Teknik Üniversitesi

ysahin@yildiz.edu.tr, iaksoy@yildiz.edu.tr, nsting@yildiz.edu.tr

#### Özet

Darbe genişlik modülasyonuna sahip (PWM) DC-DC dönüştürücüler yüksek güç yoğunlukları, hızlı dinamik cevapları ve kolay kontrollerinden dolayı endüstride geniş ölçüde kullanılmaktadır. PWM dc-dc dönüştürücülerde yüksek güç yoğunluğu ve hızlı dinamik cevap anahtarlama frekansının artırılmasıyla elde edilebilir. Fakat anahtarlama frekansının artırılması anahtarlama kayıpları ve elektromanyetik girişime (EMI) neden olur. Bu problemler sadece bastırma hücreleri yardımıyla ve yumuşak anahtarlama (SS) yapılarak giderilebilir. Bu çalışmada temel sıfır gerilimde geçiş (ZVT) ve sıfır akımda geçiş (ZCT) bastırma hücreleri ile geliştirilmiş modern bastırma hücreleri kıyaslanmıştır. Teorik karşılaştırılması yapılan dönüştürücülerin 500 W güçte 100 kHz anahtarlama frekansında simülasyonu yapılmış sonuçlar doğrulanmıştır.

#### Abstract

DC-DC converters with pulsewidth modulation (PWM) are widely used in the industry due to their high-power density, quick transition response, and ease of control. In PWM dc-dc converters, higher power density and faster transition response can be obtained by increasing the switching frequency. However, as the switching frequency increases, switching losses and electromagnetic interference (EMI) noise increase. These problems can only be solved by using soft-switching (SS) techniques realized by snubber cells. In this study a comparison was made between fundamental zero voltage transition (ZVT) and zero current transition (ZCT) snubber cells to the modern improved snubber cells. The theoretical analysis of the compared converters were completely verified by a simulation study of a 500 W output power and 100 kHz switching frequency.

#### 1. Giriş

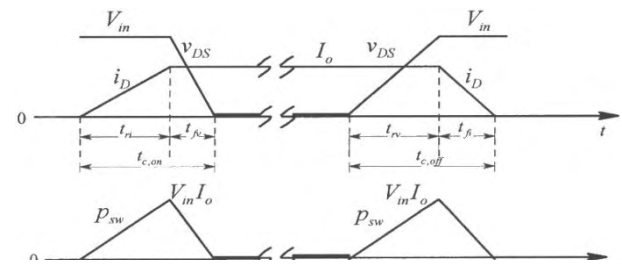
Harika dinamik performansı, basitliği, ucuzluğu ve kontrol kolaylığı dolayısıyla PWM DC-DC dönüştürücüler endüstride geniş ölçekte kullanılmaktadır [1]. PWM DC-DC dönüştürücülerde güç yoğunluğunu arttırmak ve maliyeti düşürmek için yüksek frekanslarda anahtarlama yapılmalıdır. Çünkü yüksek frekanslara çıkıldıkça endüktans, kondansatör ve transformatör boyutları ciddi oranda küçülmektedir. Fakat

anahtarlama frekansı arttıkça anahtarlama kayıpları ve elektromanyetik girişim (EMI) artmaktadır. Bu iki olumsuzluk ise dönüştürücünün toplam verimi ve çalışma performansını düşürmektedir.

Aktif bastırma hücreleri otuz yıldır PWM DC-DC dönüştürücülerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Neslinin ilk örneği olan temel bastırma hücrelerinde bir takım sorunlar ortaya çıkmıştır. Sonraki yıllarda bu sorunların üstesinden gelebilmek için birçok çalışma yapılmıştır [1-6].

#### 1.1. Anahtarlama Kavramı ve Sert Anahtarlama

Anahtarlama, aktif bir elemanın iletim durumundan kesim durumuna veya kesim durumundan iletim durumuna geçmesidir. Anahtarlama kayıpları, temel olarak, bir yarı iletken güç anahtarının iletim ve kesime girme işlemleri esnasında, gerilim ve akımın üst üste binmesi ile oluşan kayıplardır. Anahtarlama yapan eleman üzerinde oluşan bu anahtarlama kayıplarına bu elemanın parazitik kondansatörünün deşarj enerji kaybı da eklenir. Ayrıca ana diyotun ters toparlanma kayıpları da bu kayıplara ilave edilir. Sert anahtarlama (HS) olarak isimlendirdiğimiz anahtarlama geçişleri Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1 Sert anahtarlama dalga şekilleri [7]

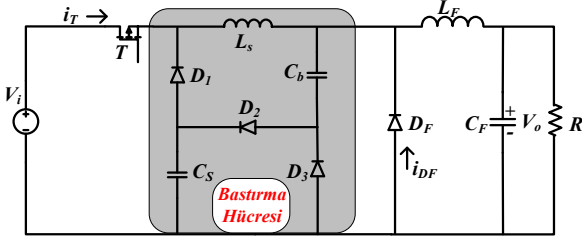
#### 2. Yumuşak Anahtarlama

PWM DC-DC dönüştürücülerde anahtarlama frekansının artırılması, ancak sert anahtarlama yerine yumuşak anahtarlama (SS) tekniklerinin kullanılması ve böylece anahtarlama kayıplarının önlenmesiyle mümkün olmaktadır. Anahtarlama kayıplarının üstesinden gelebilmek için sıfır gerilimde anahtarlama (ZVS), sıfır akımda anahtarlama

(ZCS), sıfır gerilimde geçiş (ZVT) ve sıfır akımda geçiş (ZCT) teknikleri geliştirilmiştir.

### 2.1. Pasif Bastırma hücreleri

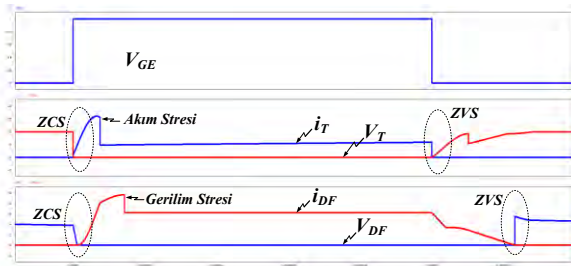
Pasif bastırma hücreleri temel DC-DC PWM dönüştürücülere LCD pasif elemanlarının eklenmesiyle gerçekleştirilir. Bu yapıya örnek teşkil edecek bir uygulama Şekil 2’de gösterilmektedir [2].



Şekil 2 Pasif bastırma hücresine sahip düşürücü dönüştürücü

Pasif bastırma hücreleri, temel dönüştürücüde seri bir endüktans ve paralel bir kondansatör yardımıyla sırasıyla akım yükselme hızı  $di/dt$  ve  $dv/dt$  gerilimi yükselme hızını sınırlar. Bu bastırma hücreleri ekstra bir yardımcı anahtara ve bu anahtar kontrol edecek bir kontrol ünitesine ihtiyaç duymaz. Bu sebepten yapıları basittir ve maliyetleri çok düşüktür. İyi tasarlandıkları takdirde bir çok aktif bastırma hücresine göre daha ucuzdurlar ve verimleri daha yüksektir. Şekil 2’deki bastırma hücresi kolay uygulanabilir, verimi yüksek ve ucuz bir tasarıma sahiptir. Ana anahtar ZCS ile iletme girerken ZVS ile SS kesime girmektedir. Ayrıca ana diyot ZCS ile iletme girerken ZVS ile kesime girmektedir.

Pasif bastırma hücrelerinde birçok avantajın yanında akım veya gerilim stresleri oluşturmaktan kaçınmazlar. Şekil 3’teki dalga şekillerinden de anlaşılacağı gibi ana anahtarda akım stresi vardır. Bu akım stresi elemanın değerini artırıp maliyeti artırırken sirkülasyon kayıpları verimi düşürür. Ana diyotta ise gerilimi stresi vardır. Gerilim stresi ise diyotun daha büyük seçilmesine sebep olur ve maliyeti artırır. Ayrıca ana akım yolu üzerindeki  $L_s$  endüktansı kayıplara neden olur. Son olarak dönüştürücünün hafif yüklerde çalışma kabiliyeti iyi değildir. Daha çok büyük güçler için uygun performans sergiler.

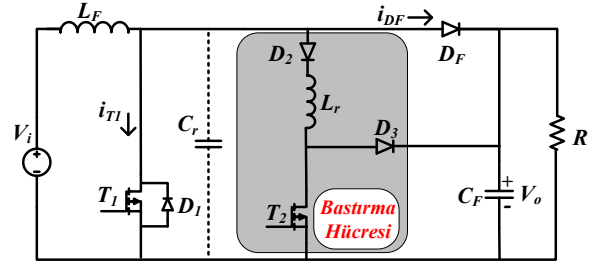


Şekil 3 Üstten aşağıya sırasıyla sürme sinyali, ana anahtar akım ve gerilimi, ana diyot akım ve gerilimi

### 2.2. Temel ZVT Aktif Bastırma Hücresi

Aktif bastırma hücrelerinin ilk örneği olan ve Şekil 4’te gösterilen dönüştürücü Hua ve arkadaşları tarafından geliştirilmiştir [3]. Aktif bir elemana ve pasif birkaç elemana

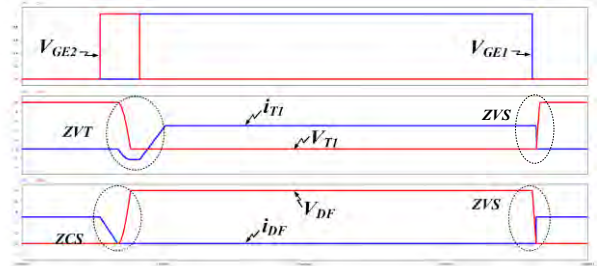
şahip bu bastırma hücresi oldukça basit ve ucuzdur



Şekil 4 Temel ZVT aktif bastırma hücresi

Bastırma hücresi, ana anahtarda hiçbir akım yada gerilim stresi oluşturmaktan ZVT ile kayıpsız bir şekilde iletme girmesini sağlar. Ayrıca ana anahtar  $C_r$  kondansatöründen dolayı ZVS ile kesime girer. Ana diyot seri  $L_r$  endüktansından ötürü ZCS ile kesime girdiği için ters toparlanma kayıpları büyük ölçüde engellenmiş olur. Ayrıca ana diyot ZVS ile iletme girmektedir. Bununla beraber  $T_2$  yardımcı anahtarındaki makul akım stresi dışında hiçbir elemanda akım ya da gerilim stresi yoktur.

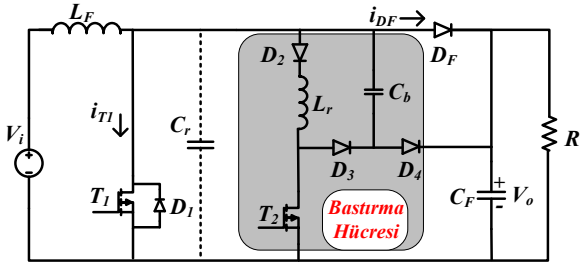
Bu dönüştürücünün temel dezavantajları ise yardımcı anahtarın sert anahtarlama ile kesime girmesidir. Bu sert anahtarlama anahtarlama kayıplarına neden olur. Bununla beraber  $C_r$  rezonans kondansatörünün şarjı yük akımına bağlı olduğu için dönüştürücünün hafif yüklerde çalışma kabiliyeti kötüdür. Dönüştürücüye ait dalga şekilleri Şekil 5’te verilmiştir.



Şekil 5 Üstten aşağıya sırasıyla T1 ve T2 sürme sinyalleri, ana anahtar akım ve gerilimi, ana diyot akım ve gerilimi

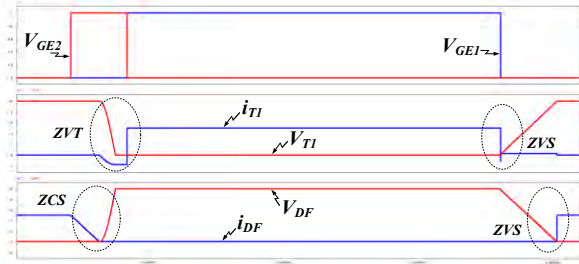
### 2.3. Geliştirilmiş ZVT Aktif Bastırma Hücresi

Temel ZVT bastırma hücresindeki dezavantajların üstesinden gelmek için Bodur ve Bakan tarafından Şekil 6’daki dönüştürücü geliştirilmiştir [1]. Bu dönüştürücüde temel yapıya nazaran bir diyot ve bir kondansatör ilavesi vardır. MOSFET elemanı kesimdeyken parazitik kondansatörleri çıkış gerilimine şarj olur. MOSFET anahtarında parazitik kondansatörü değeri diğer anahtarlara kıyasla en büyük değere sahiptir.  $C_r$  kondansatörünün anahtar üzerinden deşarj olması  $1/2CV_o^2$  değerinde bir enerjinin her periyotta kaybolması anlamına gelir. Dolayısıyla  $C_r$  kondansatöründe biriken enerji geri kazanılmalıdır. ZVT bastırma hücresine sahip yapılar MOSFET yarıiletken elemanlarının anahtarlama uygulamaları. MOSFET anahtarları daha çok küçük güçte ve yüksek frekanslı uygulamalarda kullanılan anahtarlardır.



Şekil 6 Geliştirilmiş ZVT aktif bastırma hücresi

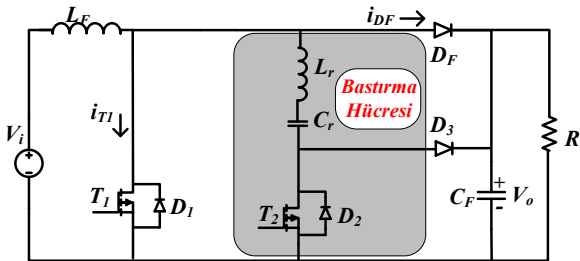
Sunulan bastırma hücresi, eklenen  $C_b$  kondansatörü yardımıyla yardımcı anahtarın yumuşak bir şekilde kesime girmesini sağlar. Böylece dönüştürücünün verimi yükseltilmiş olur. Ayrıca  $C_b$  kondansatörü yardımıyla  $T_1$  ana anahtarının kesime girmesini daha iyi bir şekilde gerçekleştirir. Ortak emitterli yapıya sahip olmasından ötürü kolay bir kontrol yapısına sahip olan bu basit ve ucuz dönüştürücünün öne çıkan en önemli dezavantajı hafif yüklerde düşük bir performansa sahip olmasıdır. Dönüştürücüye ait dalga şekilleri Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 7 Üstten aşağıya sırasıyla  $T_1$  ve  $T_2$  sürme sinyalleri, ana anahtar akım ve gerilimi, ana diyot akım ve gerilimi

#### 2.4. Temel ZCT Aktif Bastırma Hücresi

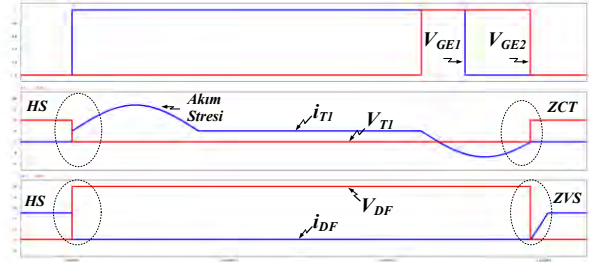
ZCT bastırma hücresinin amacı iletimdeki bir anahtarın kayıpsız bir şekilde kesime girmesidir. Bu amaçla yine Hua ve arkadaşları tarafından temel ZVT çalışmasından kısa bir süre sonra Şekil 8'deki temel ZCT bastırma hücresi literatüre kazandırılmıştır [4]. IGBT elemanında kesime girme işlemi sırasında oluşan kuyruk akımından dolayı kayıplar oluşur. ZCT bastırma hücresine sahip dönüştürücüler IGBT yarıiletken anahtarlarının anahtarlanmasında kullanılır. IGBT transistörleri orta veya büyük güç ve orta frekans uygulamalarında kullanılırlar.



Şekil 8 Temel ZCT aktif bastırma hücresi

$T_1$  ana anahtarı iletimdeyken bastırma hücresi yardımıyla önce akımı sıfıra düşürülür ve akım sıfırda tutuluyorken ana anahtarın iletim sinyali ZCT ile kayıpsız bir şekilde kesilir. Ana diyot ZVS ile iletime girerken yardımcı anahtar ZCS ile iletime girer.

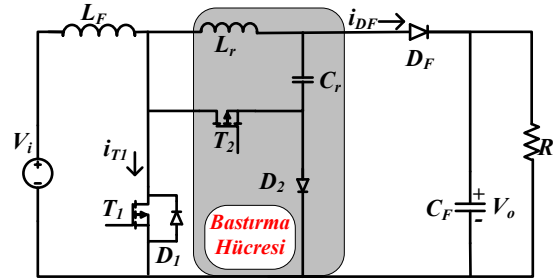
Fakat bu dönüştürücüde  $T_1$  ana anahtarı HS ile iletime girer ve  $D_F$  ana diyotu HS ile kesime girer. Ana transistörün parazitik kondansatöründeki enerji geri kazanılamaz. Ana diyot HS ile kesime girdiği için bu diyotun ters toparlanma kayıpları büyüktür. Ayrıca yardımcı anahtarın HS ile kesime girer. Bununla beraber ana anahtarda ilave akım stresi oluşması bu anahtarın değerini yükselttiği için maliyeti artırır. Dönüştürücüye ait dalga şekilleri Şekil 9'da gösterilmektedir.



Şekil 9 Üstten aşağıya sırasıyla  $T_1$  ve  $T_2$  sürme sinyalleri, ana anahtar akım ve gerilimi, ana diyot akım ve gerilimi

#### 2.5. Geliştirilmiş ZCT Aktif Bastırma Hücresi

Temel ZCT bastırma hücresine ait sorunların üstesinden gelebilmek için Lee ve arkadaşları tarafından Şekil 10'daki çalışma sunulmuştur. Temel ZCT yapısındaki eleman sayısı kadar eleman içeren bu bastırma hücresinin verimi daha yüksek ve maliyeti daha ucuzdur.

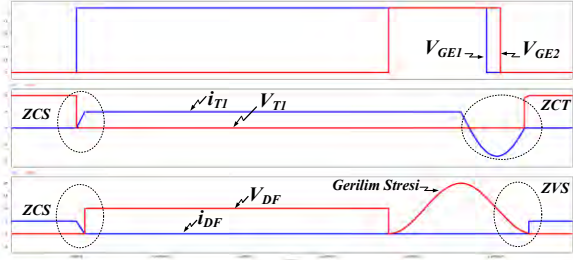


Şekil 10 Geliştirilmiş ZCT aktif bastırma hücresi

Temel ZCT yapısına göre birçok üstünlüğe sahip bu bastırma hücresinde  $L_r$  endüktansı yardımıyla ana anahtar SS ile iletime girer. Ayrıca yine bu endüktans vasıtasıyla  $D_F$  ana diyotunun ters toparlanma kayıpları büyük oranda engellenir. Yardımcı anahtar ZCS ile iletime ve kesime girer. Son olarak ana anahtarda hiçbir akım yada gerilim stresi oluşmaz. Böylece temel ZCT yapısına nazaran eleman değeri küçülmüş olur ve maliyet azalır.

İyi tasarlanmış bir bastırma hücresinde ana akım yolları üzerinde aktif ya da pasif hiçbir yardımcı elemanın olmaması istenir. Çünkü bu ana akım yolu üzerindeki elemanlar iç dirençlerinden ötürü kayıplara neden olarak verimi düşürür. Ayrıca ısınma problemine yol açarak soğutma maliyetini artırır. Bu dönüştürücüde  $L_r$  endüktansının ana akım yolu üzerinde olması bir dezavantajdır. Çünkü endüktansın iç direncinden dolayı oluşacak olan kayıplar dönüştürücü verimi

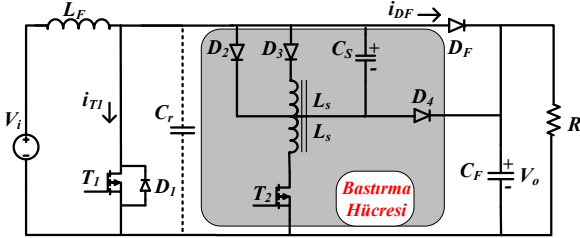
bir miktar düşürür. Bastırma hücresinin bir başka sorunu  $D_F$  ana diyotunda  $2V_o$  değerinde bir gerilim stresi oluşur. Ayrıca ana transistörün parazitik kondansatörünün enerjisi geri kazanılamaz. Geliştirilmiş ZCT dönüştürücüsüne ait dalga şekilleri Şekil 11’de gösterilmektedir.



Şekil 11 Üstten aşağıya sırasıyla T1 ve T2 sürme sinyalleri, ana anahtar akım ve gerilimi, ana diyot akım ve gerilimi

## 2.6. ZVT-ZCT Aktif Bastırma Hücresi

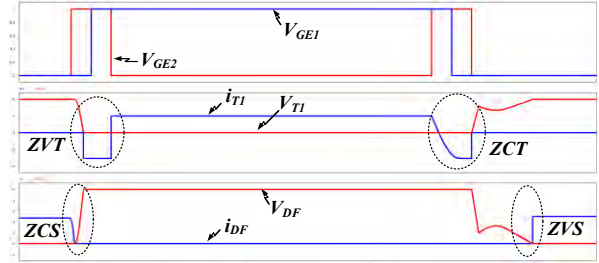
Temel ZVT ve temel ZCT bastırma hücrelerinin sorunlarının üstesinden gelebilmek için birçok çalışma literatüre kazandırılmıştır. Bu yeni çalışmalar her ne kadar bir çok problemin üstesinden gelebilse de hala çözülmesi gereken sorunlar vardır. Bazı pasif elemanların ana akım yolları üstünde olması, akım yada gerilimi stresleri, hafif yüklerde çalışma performansının düşmesi gibi sorunlar dönüştürücülerin toplam verimini düşürmekte, maliyeti arttırmakta ve dinamik performansı etkilemektedir. Bu sorunların üstesinden gelebilmek için en iyi çözüm ZVT ve ZCT çalışmayı bir tek hücrede (ZCZVT) gerçekleştirmektir. Bu konuda Bodur ve Bakan Şekil 12’deki çalışmayı gerçekleştirmiştir.



Şekil 12 ZCZVT aktif bastırma hücresi

Önceki çalışmalara kıyasla oldukça basit, ucuz ve yüksek verimli bu dönüştürücü bir T2 aktif elemanı bir kuplajlı endüktans ve birkaç pasif elemandan oluşmaktadır. Bastırma hücresi ZCZVT çalıştığı için hem MOSFET hem de IGBT uygulamalarında kullanılabilir. Hafif yüklerde iyi bir performans sergileyen dönüştürücü orta ve büyük güçlü uygulamalarda rahatlıkla uygulanabilme özelliğine sahip. Ayrıca geniş bir anahtarlama frekansında çalışma kapasitesine sahip. Dönüştürücüde ana anahtar ZVT ile kayıpsız bir şekilde iletme girerken ZCT ile kayıpsız bir şekilde kesime girer. T1 ana transistörünün parazitik kondansatör enerjisi geri kazanılır. Ana diyot ZCS ile kesime girerken ZVS ile iletme girer. Yine yardımcı anahtar SS ile iletme ve kesime girer. Bu bastırma hücresi ZVT ve ZCT çalışmanın istenilen özelliklerini tek bir hücrede bir araya getirir. Bu özelliği sergilerken hiçbir elemanda akım yada gerilim stresi oluşturmaması dönüştürücünün en önemli özelliğidir.

Dönüştürücüde öne çıkan bazı problemler ise yardımcı anahtarın anahtarlama frekansı temel çalışma frekansının iki katı olmasıdır. Önceki bölümlerde anlatılan dönüştürücülere nazaran kontrolü daha zor ve karmaşıktır. Son olarak sıkı kuplajlama yapılmadığı takdirde oluşan kaçak endüktanslar yardımcı anahtarlar gerilim piklerine neden olabilir. Dönüştürücüye ait dalga şekilleri Şekil 13’te verilmektedir.



Şekil 13 Üstten aşağıya sırasıyla T1 ve T2 sürme sinyalleri, ana anahtar akım ve gerilimi, ana diyot akım ve gerilimi

## 3. Sonuçlar

Bu çalışmada endüstride geniş ölçekte kullanılan DC-DC dönüştürücülere uygulanan bastırma hücreleri konusunda bir karşılaştırma yapılmıştır. Zaman içinde temel yapılardan ileri uygulamalara doğru giden teknolojik gelişim gösterilmiştir. Dönüştürücüler kıyaslandıktan sonra sonuçların görülmesi için PSİM 9.0.3 programıyla simülasyon yapılmış ve sonuçlar gösterilmiştir.

## 4. Kaynaklar

- [1] Bodur, H. ve Bakan, A. F., " A New ZVT-PWM DC–DC Converter ", *IEEE Trans. on Power Electron.*, Vol. 17, No. 1, pp. 40-47, 2002.
- [2] Bodur, H., Bakan, A. F. ve Baysal, M., " A Detailed Analytical Analysis of a Passive Resonant Snubber Cell Perfectly Constructed for a Pulse Width Modulated DC-DC Buck Converter", *Electrical Engineering*, Vol. 85, pp. 45-52, 2003.
- [3] Hua, G., Leu, C. S., Jiang, Y. ve Lee F. C. Y., " Novel Zero-Voltage-Transition PWM Converters ", *IEEE Trans. on Power Electron.*, Vol. 9, No. 2, pp. 213-219, 1994.
- [4] Hua, G., Yang, E., Jiang, Y. ve Lee F. C. Y., "Novel Zero-Current-Transition PWM Converters ", *IEEE Trans. on Power Electron.*, Vol. 9, No. 6, pp. 61-606, 1994.
- [5] Lee, D. Y., Lee, M. K., Hyun, D. S., Choy, I., "New Zero-Current-Transition PWM DC/DC Converters Without Current Stress", *IEEE Trans. on Power Electron.*, Vol. 18, No. 1, pp. 95-104, 2003.
- [6] Bodur, H. ve Bakan, A. F., " A New ZVT-ZCT PWM DC–DC Converter ", *IEEE Trans. on Power Electron.*, Vol. 19, No. 3, pp. 676-684, 2004.
- [7] Mohan, N., *Power Electronics and Drives*, MNPERE, USA, 2003.