

DC-DC Dönüştürücülerde Optimum Bastırma Hücresi Tasarımı Kriterleri

Yakup ŞAHİN¹, Hakan DONUK², Ali Osman GÖKCAN³

¹YTÜ Elektrik Mühendisliği, ^{2,3}Şırnak Üniversitesi Cizre MYO

¹ysahin@yildiz.edu.tr, ²hakandonuk@sirnak.edu.tr, ³mail@aliosmangokcan.com

Özet—DC-DC dönüştürücülerde güç yoğunluğunu arttırmak ve maliyeti düşürmek için yüksek anahtarlama frekansında anahtarlama yapmak gerekir. Ancak yüksek anahtarlama frekansı Elektromanyetik Girişim (EMI) ve anahtarlama kayıplarına neden olur. Ortaya çıkan bu sorunları aşmak için dönüştürücülere ilave yumuşak anahtarlama hücreleri eklenir. Eklenen bu ilave bastırma hücreleri güç yoğunluğunu arttırabildiği gibi azaltabilir. Bununla beraber dönüştürücüdeki birçok parametreyi etkileyen bastırma hücresinin tasarımı oldukça önemlidir. Bu çalışmada iyi tasarlanmış bir bastırma hücresinin sahip olması gereken özellikler sunulmuştur.

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

1. Giriş

Güç elektroniği tekniğinin gelişmesine bağlı olarak güç elektroniği dönüştürücülerini endüstride geniş bir yelpazede kullanılmaya başlanmıştır. Eskiden motor kontrolü, güç faktörü düzeltme vb. alanlarda mekanik veya hantal sistemler kullanılırken bugün bu yaklaşımlar yerini güç elektroniği dönüştürücülerine bırakmıştır. Çünkü güç elektroniği dönüştürücülerini daha ucuz, daha basit ve kullanımı daha kolaydır.

DC-DC dönüştürücüler elektrik araçlar, alternatif enerji sistemleri ve güç faktörü düzeltme gibi birçok alanda geniş ölçekte kullanılmaktadır. Bu dönüştürücülerde maliyeti düşürmek ve W/m^3 ya da W/kg olarak ifade edilen güç yoğunluğunu arttırmak için yüksek frekanslarda anahtarlama yapılmalıdır. Ancak yüksek frekanslarda anahtarlama yapmak Elektromanyetik Girişime (EMI) ve anahtarlama kayıplarına neden olmaktadır. Ortaya çıkan bu sorunların üstesinden gelebilmek için dönüştürücülere yumuşak anahtarlama (SS) ilave bastırma hücreleri eklenmesi zorunludur.

Bu çalışmada bastırma hücrelerinin tasarımını yaparken göz önünde bulundurulması gereken önemli hususlar açıklanmıştır. Ayrıca iyi tasarlanmış bir bastırma hücresinin dönüştürücüye kazandırdığı avantajlardan bahsedilmiştir.

İyi tasarlanmış bir bastırma hücresinin öne çıkan özellikleri aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- 1- Anahtarlama kayıplarını azaltması
- 2- Daha düşük EMI sağlaması
- 3- Akım ve/veya gerilim stresleri oluşturmaması
- 4- Kontrolünün kolay olması
- 5- Yüksek verime sahip olması

Bu koşullar ideal bir bastırma hücresinin sahip olması gereken özelliklerdir. Pratikte bir bastırma hücresinin tüm bu özellikleri bünyesinde barındırması oldukça güç bir durumdur. Bununla beraber, tasarlanan bastırma hücresi sayılan özelliklerden ne kadarına sahipse ortaya çıkan çalışma o derecede nitelikli bir yapıya sahip olur.

2. Anahtarlama Kayıpları ve SS

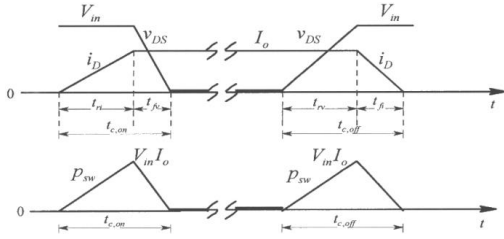
Güç elektroniği dönüştürücülerinde güç yoğunluğunu arttırmanın en önemli koşullarından ilki yüksek anahtarlama frekansına çıkılmasıdır. Çünkü yüksek anahtarlama frekansına çıkılması dönüştürücüdeki endüktans veya kondansatör gibi elemanların boyutlarının ciddi oranda küçülmesi anlamına gelir. Bu sayede artan anahtarlama frekansına bağlı olarak güç yoğunluğunu da artacaktır. Sonuç olarak yüksek anahtarlama frekansı daha büyük güç yoğunluğu sağlarken maliyeti de düşürmektedir.

Ancak anahtarlama frekansının artması birçok sorunu da beraberinde getirmektedir. Bunların başında anahtarlama kayıpları yer almaktadır.

2.1. Sert Anahtarlama ve Anahtarlama Kayıpları

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. [1]. Sert anahtarlama (HS) olarak isimlendirdiğimiz

anahtarlama geçişleri ve güç kayıpları Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1 Sert anahtarlama dalga şekilleri [2]

Bir periyot içerisinde iletme girme ve kesime girme olmak üzere iki anahtarlama durumu oluşur. Her iki durumdaki anahtarlama kayıpları hesaplanması aşağıda verilmiştir.

$$W_{on} = \int_0^{t_{on}} v_{on} i_{on} dt \quad (1)$$

$$W_{off} = \int_0^{t_{off}} v_{off} i_{off} dt \quad (2)$$

Dolayısıyla bir elemanın bir periyot içerisindeki toplam anahtarlama kaybı aşağıdaki gibi olur.

$$W_{tot} = W_{on} + W_{off} \quad (3)$$

Son olarak bir saniyedeki anahtarlama kaybı şu şekilde elde edilir:

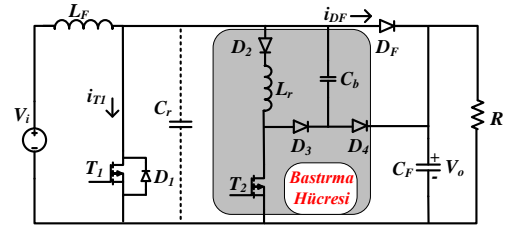
$$P_{tot} = f_p (W_{on} + W_{off}) \quad (4)$$

Buradan görüleceği gibi frekansın artmasıyla beraber anahtarlama kayıpları da artmaktadır. Bu kayıpları engellemenin tek yolu ise yumuşak anahtarlama tekniklerinin kullanılmasıdır.

2.2. Yumuşak Anahtarlama (SS)

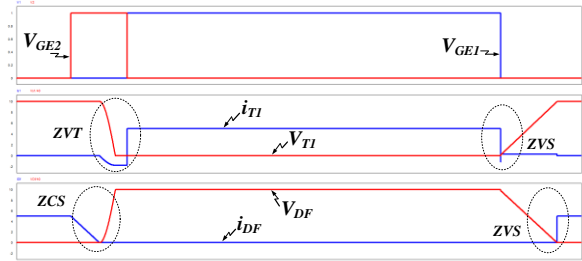
Yumuşak anahtarlama, ilave bir bastırma hücresi ile iletme ve /veya kesime girme anahtarlama kayıplarının minimize edilmesi ya da tamamen yok edilmesidir. Klasik bastırma hücrelerinde anahtarlama kayıpları kısmen engellenebilir. Fakat modern bastırma hücrelerinde anahtarlama kayıpları tamamen yok edilir.

Şekil 2'de aktif bastırma hücresine sahip sıfır gerilim geçişli (ZVT) PWM DC-DC bir dönüştürücü görülmektedir [3]. Bu çalışma modern bastırma hücreleri içinde ZVT anahtarlama sağlayan en ileri dönüştürücülerden biridir. Şekil 3'te ise bu dönüştürücüye ait dalga şekilleri gösterilmiştir.



Şekil 2 ZVT PWM DC-DC Dönüştürücü

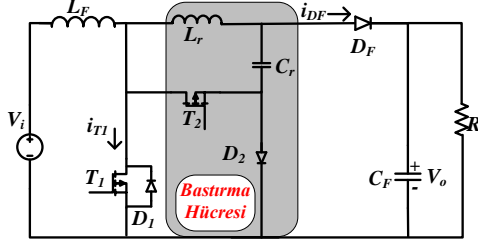
Dönüştürücüde ana anahtar ZVT ile iletme girerken sıfır gerilimde anahtarlama (ZVS) ile kesime girmektedir. Böylece ana anahtarda, iletme ve kesime girme işleminde, anahtarlama kayıpları tamamen sıfırlanmıştır. Aynı zamanda ana diyot sıfır akımda anahtarlama (ZCS) ile kesime girerken ZVS yumuşak anahtarlama ile iletme girmektedir. Basit yapısı, düşük maliyeti ve yüksek verimi bu dönüştürücünün en önde gelen özelliklerinden birkaçıdır.



Şekil 3 Üstten aşağıya sırasıyla T1 ve T2 sürme sinyalleri, ana anahtar akım ve gerilimi, ana diyot akım ve gerilimi

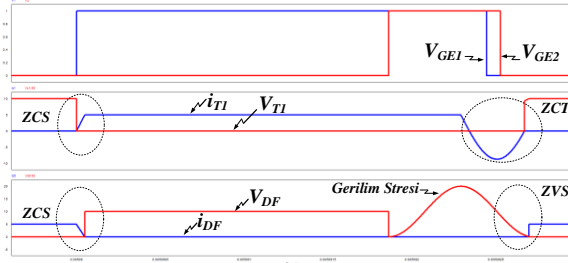
Güç elektroniği dönüştürücülerinde kullanılan anahtarlama elemanı MOSFET ise bu dönüştürücüde ZVT anahtarlama tekniğine sahip bastırma hücrelerinin kullanılması gerekir. MOSFET elemanının parazitik kondansatör değeri diğer anahtarlama elemanlarının hepsinden daha büyüktür. Bu anahtarın çok hızlı iletme girmesi ve parazitik kondansatörün anahtar üzerinden deşarj olması, iletme girme esnasında büyük anahtarlama kayıpları olması anlamına gelir. Bu nedenle bu problemin üstesinden gelebilmek için ZVT tekniği geliştirilmiştir.

Şekil 4'te aktif bastırma hücresine sahip sıfır akım geçişli (ZCT) PWM DC-DC dönüştürücü görülmektedir [4]. Bu çalışma ise modern bastırma hücreleri içerisinde ZCT tekniğinin uygulandığı en ileri dönüştürücülerden biridir. Şekil 5'te ise bu dönüştürücüye ait dalga şekilleri verilmiştir.



Şekil 4 ZCT PWM DC-DC Dönüştürücü

Bu dönüştürücüde ana anahtar ZCS ile iletme girerken ZCT ile kayıpsız bir şekilde kesime girmektedir. Ana diyot ise ZCS ile kesime girmekte ve ZVS ile kayıpsız bir şekilde iletme girmektedir. Basit yapısı ve düşük maliyeti ile oldukça üste düzey bir çalışma sergilemektedir. Dönüştürücüdeki en büyük problem ise ana diyotun çıkış geriliminin iki katı gerilim stresine maruz kalmasıdır.



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

Dönüştürücülerde kullanılan anahtarlama elemanının IGBT olması durumunda uygulanması gereken yumuşak anahtarlama tekniği ZCT anahtarlama tekniğidir. IGBT elemanları kesime girerken oluşan kuyruk akımları oldukça büyük kayıplara neden olmaktadır. Oluşan bu kayıpların önüne geçmek için ZCT anahtarlama tekniği geliştirilmiştir.

Son olarak hem ZVT hem de ZCT anahtarlama tekniğini bir tek hücrede bir araya getiren (ZCZVT) bastırma hücreleri de geliştirilmiştir [6-11]. Ancak bu dönüştürücülerde kontrolün oldukça zor olması ve sirkülasyon kayıplarının fazla olması bu dönüştürücüleri endüstriyel olarak kullanılmasının önüne geçmektedir.

3. Elektromanyetik Girişim (EMI)

Elektromanyetik alanın Elektrik Alan (EA) ve Manyetik Alan (MA) olmak üzere iki temel bileşeni bulunmaktadır. Günlük hayatta elektromanyetik dalga yayan birçok cihaz bulunmaktadır. Oluşan bu elektromanyetik dalgalar çevresindeki birçok cihazın çalışmasını etkilemekte ve performansını

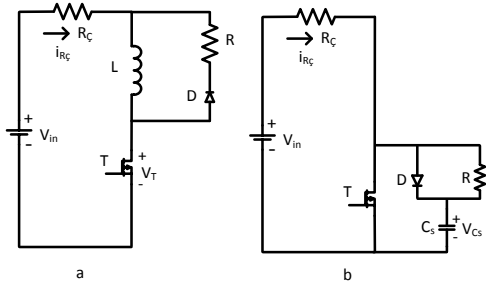
düşürmektedir. Bu nedenle birçok elektronik cihazın EMI etkilerine uyumlu olması gerekir. Bu konuda bir çok uluslar arası standart geliştirilmiştir [5]. Elektromanyetik dalga yayan birkaç kaynak aşağıda verilmiştir.

- Cep telefonları
- Baz istasyonları
- Radarlar vs.

DC-DC dönüştürücülerde ise elektromanyetik girişim oluşumu iki temel etkene bağlıdır. Bunlardan ilki akım yükselme hızıdır. Dönüştürücüde anahtarlama anında di/dt akım yükselme hızı çok yüksek olursa bu durum elektromanyetik girişime neden olur. İkincisi ise, yine anahtarlama durumunda dv/dt gerilim yükselme hızı çok yüksek olursa, bu durum da elektromanyetik girişime neden olur.

EMI etkisi çevredeki cihazların çalışmasını etkilediği gibi aynı zamanda dönüştürücüde kayıplara neden olur ve toplam verimi düşürür. Bu sebepten EMI etkisinin mümkün olan en küçük seviyeye düşürülmesi gerekir.

Klasik DC-DC dönüştürücülerde ana anahtara seri endüktans bağlanarak iletme girme esnasında akımın yükselme hızı sınırlandırılır ve EMI minimize edilir. Bu durum Şekil 6(a)'da gösterilmiştir. Aynı zamanda ana anahtara paralel kondansatör bağlanarak gerilimin yükselme hızı sınırlandırılır ve kesime girmede EMI değeri oldukça düşük seviyelere indirilir. Bu yaklaşım ise Şekil 6 (b)'de görülmektedir.



Şekil 6 Seri bastırma hücresi (a) ve paralel bastırma hücresi (b) [12]

Dikkat edilirse seri endüktans ve paralel kondansatör hem yumuşak anahtarlama sağlamaktadır hem de EMI etkisini azaltmaktadır. Modern anahtarlama teknikleri olan ZVT ve ZCT çalışmalarda ise anahtarlama tekniğinin özelliğinden dolayı EMI etkisi tamamen engellenir. Dolayısıyla bu uygulamalarda herhangi bir ek düzene gerek yoktur.

4. Akım ve Gerilim Stresi

DC-DC dönüştürücülere uygulanan bastırma hücrelerinin bazıları ana anahtarlarda yumuşak anahtarlama sağlarken ana elemanlarda ilave akım

stresi[6,8-11] bazısı da gerilim stresi oluşturur[4]. Bazı dönüştürücüler ise ana anahtarlarda akım ya da gerilim stresi oluşturmazken yardımcı elemanlarda bu stresleri oluşturur [7]. Bu her üç durum da istenmeyen durumlardır.

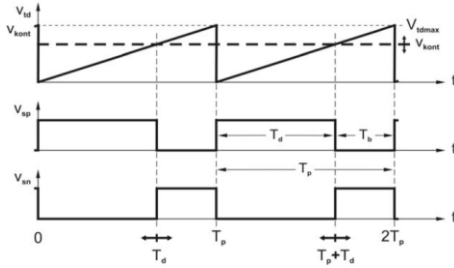
İlave akım stresleri yarıiletken elemanlarda iletim kayıplarına neden olur ve verimi düşürür. Aynı zamanda elemanın akım dayanım değerini yükseltir ve daha büyük eleman seçilmesine neden olur. Bu ise maliyeti artırıcı bir unsurdur.

İlave gerilim stresi ise kayıplara neden olmaz ancak yarıiletken elemanın gerilim dayanım değerini yükselttiği için daha büyük eleman seçilmesini zorunlu kılar. Bu durum da maliyeti arttıran unsurlardan biridir.

Dolayısıyla iyi tasarlanmış bir bastırma hücresinde ana elemanlar başta olmak üzere hiçbir elemanda ilave akım ya da gerilim stresi oluşmaması gerekir.

5. Kontrol kolaylığı

Güç Elektroniği dönüştürücülerinde kontrol en önemli unsurlarından biridir. Zira ortaya konulan çalışmanın endüstriyel olarak uygulanabilmesi için kolay bir kontrol yapısına neden olması gerekir. DC-DC dönüştürücülerde en çok kullanılan kontrol metodu ise Darbe Genişlik Modülasyonu (PWM) metodudur. PWM kontrol metoduna ait dalga şekilleri Şekil 7’de görülmektedir.



Şekil 7 PWM kontrol metoduna ait dalga şekilleri [12]

Bu kontrol metodunda testere dişi bir dalga ile bir kontrol gerilimi karşılaştırılarak pozitif ve negatif olmak üzere iki çıkış sinyali elde edilir. Testere dişi dalganın frekansı değiştirilerek anahtarlama frekansı değiştirilebilir.

Bazı uygulamalarda kontrol gerilimi sabit tutulur ve testere dişi dalganın genliği değiştirilerek doluluk oranı (λ) ayarlanır. Ancak genellikle testere dişi dalganın genliği sabit tutulur ve kontrol gerilimi değiştirilerek doluluk oranı belirlenir.

$$\lambda = \frac{V_{kont}}{V_{tmax}} \quad (5)$$

İyi tasarlanmış bir dönüştürücüde sadece PWM kontrol metodunun olması yeterli değildir. Aynı zamanda maliyet düşürücü birkaç unsurun daha olması gerekir.

Sadece ZVT ya da sadece ZCT anahtarlama özelliğine sahip dönüştürücüler ZCZVT dönüştürücülere göre daha çok kullanım alanına sahiptir. Çünkü ZVT ya da ZCT bastırma hücrelerinde yardımcı anahtarın anahtarlama frekansı dönüştürücünün anahtarlama frekansı ile aynıdır. Ama ZCZVT bastırma hücrelerinde yardımcı anahtarın anahtarlama frekansı dönüştürücünün anahtarlama frekansının iki katıdır. Çünkü yardımcı anahtar hem ana anahtarın iletime girmesine hem de kesime girmesine yardımcı olur. Ayrıca ZCZVT bastırma hücrelerinde kontrol sinyallerini oluşturmak karmaşık ve zordur. Bu kontrol zorluğundan ötürü ZCZVT dönüştürücüler çok fazla uygulama alanı bulamamaktadır.

Maliyet düşürücü bir başka unsuru ise bastırma hücresinde yer alan anahtar ile ana anahtarın ortak emitter yapısına sahip olmasıdır. Şekil 2’de verilen dönüştürücüde ana anahtar ile yardımcı anahtarın ortak emitter yapısına sahip olduğu görülebilir ancak Şekil 3’teki yapıda ortak emitter yapısı mevcut değildir.

Ortak emitter yapısına sahip olmayan dönüştürücülerde sinyal izolasyonuna ihtiyaç vardır. Bu durumda ise ekstra bir kaynağa ihtiyaç vardır. Böylece dönüştürücünün maliyeti yükselmiş olur. Ortak emitter yapısına sahip dönüştürücülerde ise sinyal izolasyonuna gerek yoktur.

6. Yüksek Verim

Gelişen toplumlarda çevre duyarlılığının artmasına paralel olarak elektrikli cihazların verimlerine de belirli sınırlamalar getirilmiştir. Bu nedenden ötürü güç elektroniği dönüştürücülerinde çok önemli konulardan birisi de dönüştürücünün toplam verimidir. Dönüştürücünün toplam verimini arttırmak için bazı noktalar dikkate alınmalıdır.

- Dönüştürücüye omik etkiye sahip herhangi bir eleman eklenmemelidir.
- Bastırma hücresine aktarılan enerji çıkışa aktarılmalıdır.
- Rezonanstan dolayı oluşan kayıpların düşük olması için sirkülasyonun az olması gerekir.
- Bastırma hücresinde mümkün olan en az eleman kullanılmalıdır.

7. Sonuç

Endüstride geniş bir yelpazede kullanılan DC-DC dönüştürücülerde güç yoğunluğunu arttırmak ve maliyeti düşürmek için yüksek anahtarlama frekansında anahtarlama yapmak gerekir. Ancak yüksek anahtarlama frekansı Elektromanyetik Girişim (EMI) ve anahtarlama kayıplarına neden olur. Ortaya çıkan bu sorunları aşmak için dönüştürücülere ilave yumuşak anahtarlama hücreleri eklenir. Eklenen bu bastırma hücrelerinin dönüştürücüye yarar mı sağlayacağı zarar mı vereceği tamamen tasarım ile alakalı bir konudur. Bu nedenle bastırma hücresi tasarımı yaparken bazı noktaların gözden kaçırılmaması gerekir. Bu çalışmada iyi tasarlanmış bir bastırma hücrelerinin sahip olması gereken özellikler sunulmuştur.

Kaynaklar

- [1] Şahin, Y., Aksoy, İ. ve Tınç, N. S. "DC-DC Dönüştürücülerde Kullanılan Yumuşak Anahtarlama Yöntemlerinin Karşılaştırılması", ELECO, S. 235-238, Bursa, 2014
- [2] Mohan, N., Power Electronics and Drives, MNPERE, USA, 2003.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Akçam, N. ve Şen, G. S. "Hava Araçlarında Elektromanyetik Işımanın Personele Zararları (HERP)", Pamukkale Üniv. Müh. Bil. Dergisi., Sayı. 20, S. 304-309, 2014.
- [6] Stein, C. M. and Hey, H. L. "A True ZCZVT Conutation Cell for PWM Converters", *IEEE Trans. on Power Electron.*, Vol. 15, No. 1, pp. 185-193, 2000.
- [7] Adib, E. and Farzenahfard H. "Family of Zero Current Voltage Transition PWM Converters", *IET Power Electronics*, Vol. 1, No. 2, pp. 214-223, 2008.
- [8] Bakan, A. F., Bodur, H. ve Aksoy, İ "A Novel ZVT-ZCT PWM DC-DC Converter", EPE, Dresden, 2005
- [9] Yang, S. P., Lin, J. L. and Chen, S. J. "A Novel ZCZVT Forward Converter With Synchronous Rectification", *IEEE Trans. on Power Electron.*, Vol. 21, No. 4, pp. 912-922, 2006.
- [10] Jain, N., Jain, P. K. and Joos, G. " A Zero Voltage Transition Boost Converter Employing A Soft Switching Auxiliary Circuit With Reduced Conduction Losses" *IEEE Trans. on Power Electron.*, Vol. 19, No. 1, pp. 130-139, 2004.
- [11] 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.
- [12] Bodur, H., Güç Elektroniği, Birsen Yayınevi, İstanbul, 2012