

# IGBT Tabanlı Tam Köprü PSPWM DC-DC Dönüştürücüde Bastırma Kondansatörlerinin Belirlenmesi

## Determination of the Snubber Capacitors in IGBT Based Full Bridge PSPWM DC-DC Converter

A. Faruk BAKAN, Hacı BODUR, İsmail AKSOY, Nihan ALTINTAŞ

Elektrik Mühendisliği Bölümü  
Yıldız Teknik Üniversitesi

fbakan@yildiz.edu.tr, bodur@yildiz.edu.tr, iaksoy@yildiz.edu.tr, naltin@yildiz.edu.tr

### Özet

Faz Kaymalı Darbe Genişlik Modülasyonlu (PSPWM) DC-DC dönüştürücüde MOSFET'lerin yerine IGBT'lerin kullanılması durumunda, IGBT'lerin kesime girmedeki anahtarlama kayıplarının azaltılması için ilave bastırma kondansatörlerinin kullanılması gerekmektedir. Bu çalışmada, 300 V DC giriş gerilimi ve 200 A DC çıkış akımı değerlerine sahip olan IGBT'li bir tam köprü türü PSPWM DC-DC dönüştürücüde, IGBT'lere paralel bağlanan bastırma kondansatörlerinin değerlerine göre anahtarlama kayıplarının değişimi incelenmiştir. Bu amaçla, dönüştürücü PROTEUS programı ile simüle edilerek bir güç elemanının anahtarlama anındaki akım ve gerilim değişimleri kaydedilmiş, daha sonra MATLAB ortamında yazılan bir program ile enerji kayıpları hesaplanmıştır. Bir IGBT'nin kesime girmedeki anahtarlama kaybının, orantılı olmasa da kondansatör değerinin artması ile azaldığı, aynı zamanda IGBT'nin kıvrık akımı ve hızı ile sürme direncine bağlı olduğu görülmüştür.

### Abstract

It is required to use additional snubber capacitors in order to reduce turn off losses of the IGBTs when using IGBTs instead of MOSFETs in Phase Shift Pulse Width Modulation (PSPWM) DC-DC converters. In this study, variation of the switching losses according to the values of the parallel snubber capacitors in the IGBT based full bridge PSPWM DC-DC converter having the values of 300 V DC input voltage and 200 A DC output current is analyzed. For this purpose, the voltage and current waveforms of the switching element are recorded and then energy losses are calculated with a program written in MATLAB. It is observed that the turn off switching losses of an IGBT, although it is not proportional, is decreased with increasing capacitor value and is also dependent on tail current, speed and gate drive resistance of the IGBT.

### 1. Giriş

Anahtarlama gücü kaynakları, yüksek gerilimli güç kaynakları, akümülatör şarjı, kaynak makineleri vb.

**Bu çalışma 107E149 nolu proje kapsamında TÜBİTAK tarafından desteklenmektedir.**

endüstriyel uygulamalarda, yüksek güç ve frekanslarda genellikle tam köprü türü izoleli DC-DC dönüştürücüler kullanılmaktadır. Tam Köprü (FB) türü bu dönüştürücülerde, anahtarlama kayıpları ile güç anahtarlarının parazitik kapasitansları ve transformatörün kaçak endüktansı arasında oluşan parazitik salınımlar kabul edilemez düzeylere erişmektedir. Bu uygulamalarda, modern Yumuşak Anahtarlama (SS) yöntemleri kullanılarak, anahtarlama kayıpları ile güç elemanlarının akım ve gerilim streslerinin etkili bir şekilde azaltılması, böylece devre veriminin veya güç yoğunluğunun yükseltilmesi ve Elektro Manyetik Girişimin (EMI) düşürülmesi gerekmektedir [1-4].

Çoğunlukla MOSFET'in kullanıldığı bu tür dönüştürücülerde, genellikle Faz Kaydırma (PS) yöntemi uygulanarak, güç elemanlarının parazitik kapasitansları ile transformatörün kaçak endüktansı arasında bir Kısmi Rezonans (QR) oluşturulmakta, böylece kaçaklar yararlı hale dönüştürülmekte ve SS elde edilmektedir. Burada, MOSFET iletime girmeden önce kaçak endüktans ile parazitik kapasitanslarda biriken enerjiler deşarj edilerek, MOSFET'in Sıfır Gerilim Geçişi (ZVT) ile iletime ve Sıfır Gerilimde Anahtarlama (ZVS) ile kesime girmesi sağlanmaktadır. Literatürde bu dönüştürücüler ile bunların problemlerini çözmeye yönelik pek çok çalışma yer almaktadır [5-12].

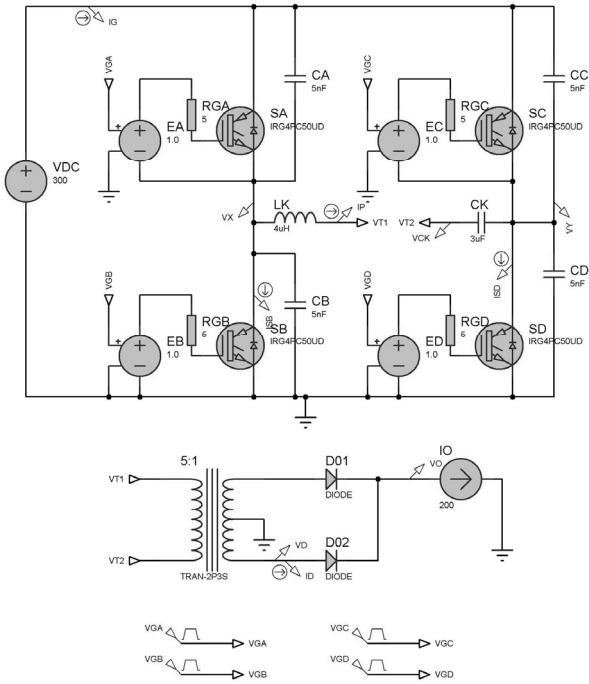
Faz Kaymalı Darbe Genişlik Modülasyonu (PSPWM) tekniği, MOSFET'in yüksek değerli parazitik kondansatörünü kullanarak anahtarlama kayıplarının önlenmesi amacıyla geliştirilmiştir. Yüksek gerilimde MOSFET'in iç direncinin yüksek olması, iletim kayıplarını artırmakta ve dönüştürücü veriminin düşmesine yol açmaktadır. Bu nedenle ve ekonomik açıdan, endüstriyel uygulamalarda MOSFET yerine IGBT tercih edilmektedir. Bu durumda ise, IGBT'nin kesime girmedeki anahtarlama kaybının azaltılması için ilave bir bastırma kondansatörünün kullanılması gerekmektedir [7].

Yayınlarda kondansatör değerine göre IGBT'nin yaklaşık ZVS altında kesime girdiği kabul edilmektedir. Ancak, boşta çalışmada kondansatör deşarjının doğrudan IGBT üzerinden sağlanması durumunda, IGBT'nin bozulma riskinin ortaya çıktığı bilinmektedir. Dolayısıyla, paralel kondansatör değerinin seçimi büyük bir önem taşımaktadır.

Bu çalışmada, 300 V DC giriş gerilimi ve 200 A DC çıkış akımı değerlerine sahip olan IGBT'li bir tam köprü türü PSPWM DC-DC dönüştürücüde, IGBT'lere paralel bağlanan bastırma kondansatörlerinin değerlerine göre anahtarlama kayıplarının değişimi incelenmiştir.

## 2. PSPWM Dönüştürücü Simülasyonu

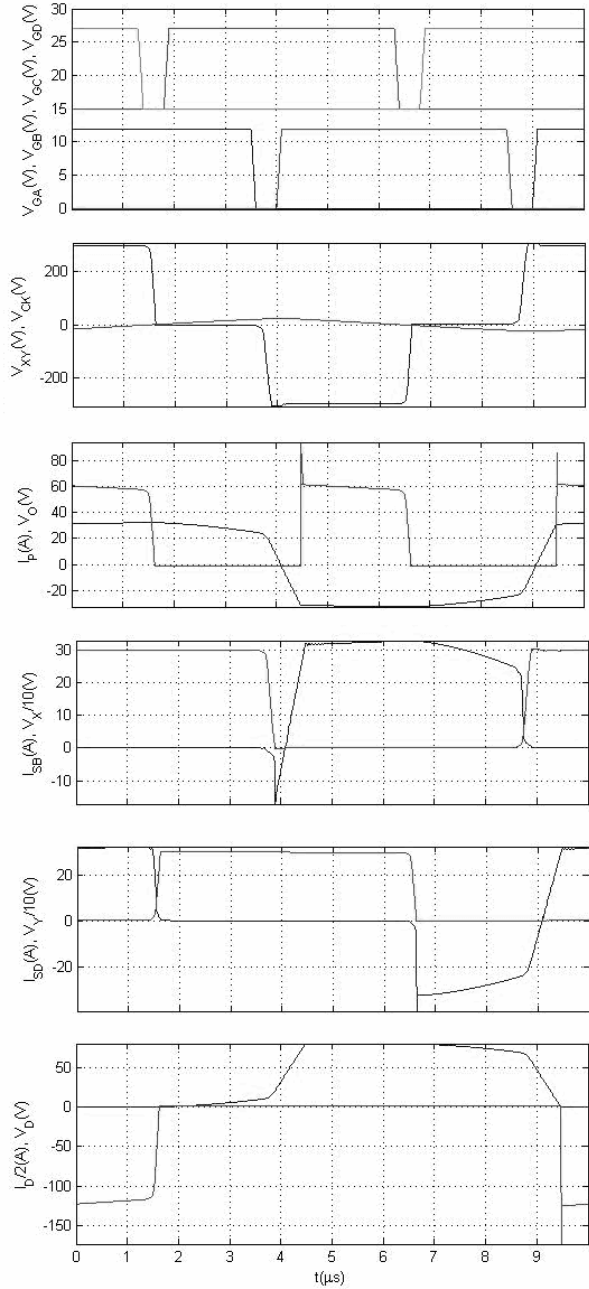
IGBT tabanlı PSPWM dönüştürücünün devre şeması Şekil.1'de verilmiştir. Dönüştürücü simülasyonu PROTEUS programı ile gerçekleştirilmiştir. Devrede kullanılan yüksek frekans transformatorünün parametreleri Tablo 1'de verilmiştir. Transformatorün toplam kaçak endüktansı  $L_K=5\mu\text{H}$  alınmıştır. Geçici rejimde transformatorün doyuma girmemesi için  $C_K=5\mu\text{F}$  değerinde seri bir kondansatör kullanılmıştır. İzoleli sürme devrelerini temsil etmek üzere kazancı 1 olan gerilim kontrollü gerilim kaynakları ( $E_A$ ,  $E_B$ ,  $E_C$  ve  $E_D$ ) kullanılmıştır.



Şekil 1. Simülasyonu yapılan PSPWM dönüştürücü

Devrede kullanılan IGBT'nin katalog bilgileri Tablo.2'de verilmiştir. Sürme dirençleri ( $R_{GA}$ ,  $R_{GB}$ ,  $R_{GC}$  ve  $R_{GD}$ ) IGBT kataloğuna göre  $5\Omega$  seçilmiştir.  $V_{dc}=300\text{V}$ , çalışma frekansı  $100\text{kHz}$  ve  $I_o=200\text{A}$  için simülasyon ile elde edilen değişimler Şekil 2'de verilmiştir. PSPWM dönüştürücüde bir koldaki sürme sinyallerinin bağlı iletim oranı %50 olup güç kontrolü faz farkı ile yapılmaktadır. Rezonans geçişleri için yeterli miktarda ölü zaman bırakılması gereklidir. Çapraz elemanların iletimde olduğu aralıkta çıkışa güç aktarılır. Diğer aralıkta primerden serbest dolaşım akımı geçer.

PSPWM yönteminde güç elemanları ZVT ile iletime ve ZVS ile kesime girmektedir. ZVT ile iletime girme durumunda anahtarlama kayıpları sıfır kabul edilir. ZVS ile kesime girme işlemi ise bir miktar anahtarlama kaybı mevcuttur. Faz kaymalı PWM yönteminde sağ koldaki eşdeğer paralel kapasite ( $C_r$ ) sabit akım ile deşarj olmaktadır. Sol kolda ise eşdeğer paralel kapasite rezonans ile deşarj olur.



Şekil 2. Sürme sinyalleri ( $V_{GA}$ ,  $V_{GB}$ ,  $V_{GC}$ ,  $V_{GD}$ ), fazlar arası gerilim ( $V_{XY}$ ), seri kondansatör gerilimi ( $V_{CK}$ ), primer akımı ( $I_p$ ), çıkış gerilimi ( $V_o$ ),  $S_B$  anahtarının akımı ( $I_{SB}$ ), sol kol faz gerilimi ( $V_x$ ),  $S_D$  anahtarının akımı ( $I_{SD}$ ), sağ kol faz gerilimi ( $V_y$ ), çıkış diyodu akımı ( $I_D$ ) ve çıkış diyodu gerilimi ( $V_D$ ) değişimleri

Tablo 1. Transformator Modeli

TRANS-2P3S	
Dönüştürme Oranı	5 : 1
Primer Endüktansı	500 $\mu\text{H}$
Sekonder Endüktansı	40 $\mu\text{H}$
Kuplaj (M)	1
Primer direnci	5 m $\Omega$
Sekonder direnci	1 m $\Omega$

**Tablo.2.** IGBT (IRG4PC50UD) Katalog Verileri

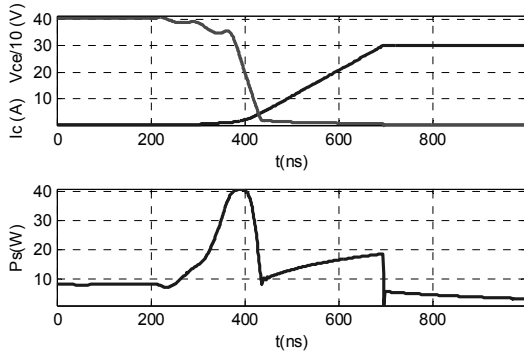
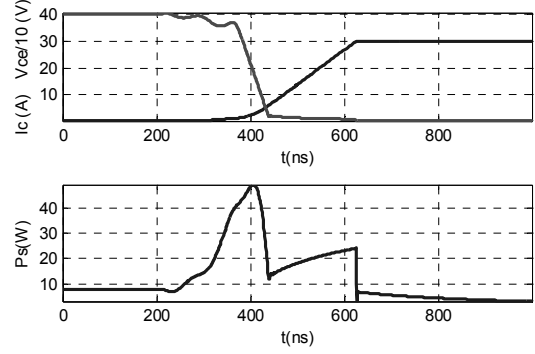
$T_j = 25^\circ\text{C}$ $I_c = 27\text{A}$ , $V_{dc} = 480\text{V}$ , $V_{ge} = 15\text{V}$ , $R_g = 5.0\Omega$	
$t_r$	46 ns
$t_f$	74-110 ns
$E_{on}$	0.99 mJ
$E_{off}$	0.59 mJ
$E_{total}$	1.58 mJ
$T_j = 125^\circ\text{C}$ $I_c = 27\text{A}$ , $V_{dc} = 480\text{V}$ , $V_{ge} = 15\text{V}$ , $R_g = 5.0\Omega$	
$t_r$	27 ns
$t_f$	130 ns
$E_{total}$	2.3 mJ

### 3. Paralel Kondansatörün IGBT'nin Kesim Davranışına Etkisi

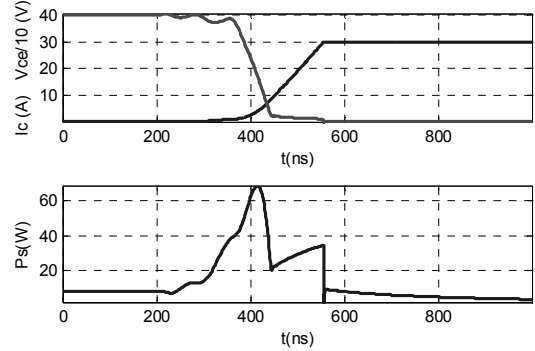
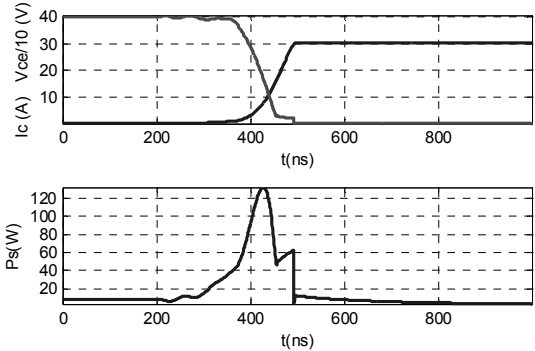
PSPWM devresinde sabit akım geçirmekte olan bir IGBT'nin sürme sinyali kesildiğinde IGBT'ye paralel kapasiteye göre anahtarlama kayıpları değişmektedir. Şekil 1'de gösterilen IGBT tabanlı PSPWM devresinde nominal akımda sağ kolda bulunan  $S_D$  elemanının sürme sinyali kesildiğinde eşdeğer  $C_r$  ( $C_C/C_D$ ) kondansatörüne bağlı olarak ZVS kayıplarının değişimi simülasyon ile incelenmiştir.  $C_r$ 'nin farklı değerleri için elde edilen akım, gerilim ve anahtarlama güç kaybı değişimleri Şekil 3-10'da verilmiştir. Devre önce PROTEUS programı ile simüle edilerek bir elemanın anahtarlama esnasındaki akım ve gerilim değişimleri kaydedilmiş, daha sonra MATLAB ortamında yazılan bir program ile enerji kayıpları hesaplanmıştır.

Simülasyonlarda eşdeğer paralel kondansatörün artırılması ile kesime girmedeki ani güç kaybı ile anahtarlama kayıplarının azaldığı görülmektedir. Farklı  $C_r$  kapasiteleri için simülasyon ile elde edilen  $P_s$  güç değişimleri nümerik olarak entegre edilerek, hesaplanan  $E_{off}$  anahtarlama enerjileri Tablo 3'te verilmiştir.

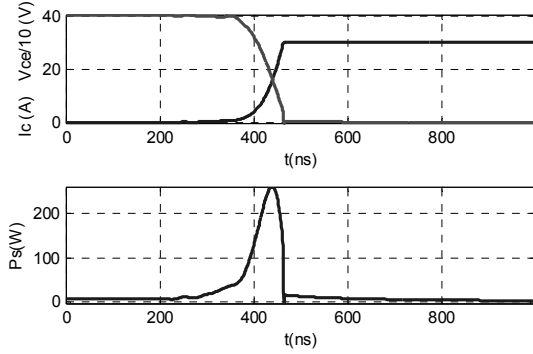
Boşta çalışmada paralel kondansatör IGBT üzerinden deşarj olur ve IGBT'nin sürme sinyalinin verilmesi ile elemandan  $I_{Cmax}$  akımı geçer. Paralel kondansatörün değerine bağlı olarak artan bu akım simülasyon ile elde edilerek Şekil 11 ve Tablo.3'te verilmiştir. Sürme direncinin artırılması ile IGBT yavaşlatılarak bu akım bir miktar azaltılabilir.

**Şekil 3.**  $C_r = 40$  nF için akım, gerilim ve anahtarlama güç kaybı değişimleri**Şekil 4.**  $C_r = 30$  nF için akım, gerilim ve anahtarlama güç kaybı değişimleri

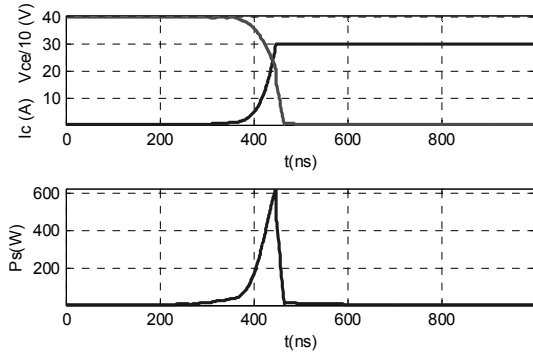
Kondansatörlerin IGBT üzerinden deşarj sırasında geçen aşırı akım, katalogta verilen maksimum IGBT akımını geçerse IGBT'nin tahrip olmasına yol açabilir. Bu bozulma aşırı akım anında kapı üzerinde oluşan aşırı gerilimden de kaynaklanır. Uygulamada kapıda oluşan bu ani gerilim darbelerini bastırmak için transil diyot kullanılması gerekmektedir.

**Şekil 5.**  $C_r = 20$  nF için akım, gerilim ve anahtarlama güç kaybı değişimleri**Şekil 6.**  $C_r = 10$  nF için akım, gerilim ve anahtarlama güç kaybı değişimleri

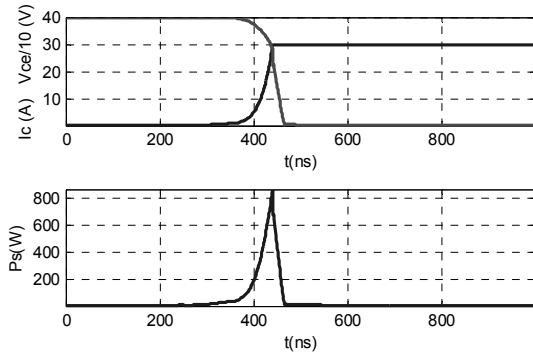
Simülasyon sonuçlarından  $C_r$  kondansatörünün artırılmasının  $E_{off}$ 'u aynı oranda azaltmadığı görülmektedir. IGBT'nin kuyruk akımından dolayı kapasitenin artması ZVS ile kesime girme davranışını orantılı olarak azaltmamaktadır. Uygulamada kuyruk akımı daha düşük olan hızlı IGBT'lerde Tablo 3'te verilen  $E_{off}$  sonuçlarından daha iyi sonuçlar elde edilebilir. Ayrıca sıcaklığın artmasına bağlı olarak  $E_{off}$  değerleri genellikle bir miktar daha kötüleşmektedir.



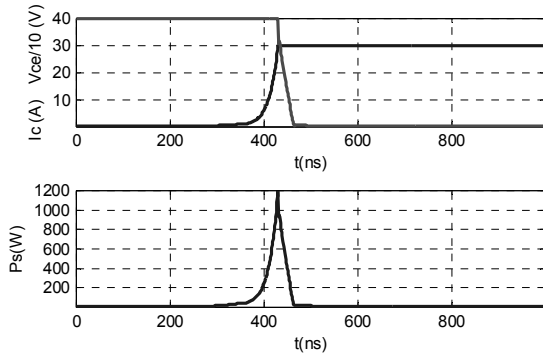
Şekil 7.  $C_r = 5$  nF için akım, gerilim ve anahtarlama güç kaybı değişimleri



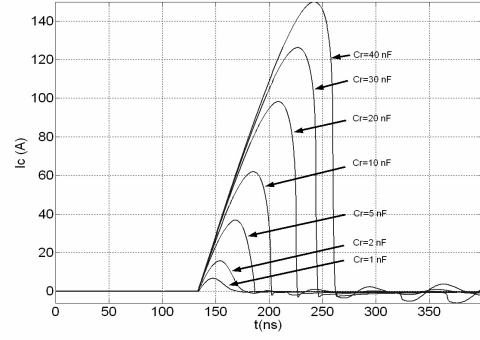
Şekil 8.  $C_r = 2$  nF için akım, gerilim ve anahtarlama güç kaybı değişimleri



Şekil 9.  $C_r = 1$  nF için akım, gerilim ve anahtarlama güç kaybı değişimleri



Şekil 10.  $C_r = 0$  için akım, gerilim ve anahtarlama güç kaybı değişimleri



Şekil 11. Boşta çalışmada  $C_r$  kondansatörünün IGBT üzerinden deşarjı durumunda geçen akım değişimleri

Tablo.3.  $C_r$ 'ye bağlı olarak  $E_{off}$  anahtarlama enerjisi

$C_r$ (nF)	$E_{off}$ (mJ)	$I_{Cmax}$ (A)
40	0.12	150
30	0.13	126
20	0.14	98
10	0.18	62
5	0.24	37
2	0.34	16
1	0.40	7
0	0.47	-

#### 4. Sonuçlar

Bu çalışmada, IGBT tabanlı bir PSPWM dönüştürücüde IGBT'lerin kesimdeki anahtarlama kayıplarının azaltılması için kullanılan paralel bastırma kondansatörlerinin etkisi incelenmiştir. Burada, bir IGBT'nin kesime girmedeki anahtarlama kaybının, orantılı olmasa da kondansatör değerinin artması ile azaldığı, aynı zamanda IGBT'nin kuyruk akımı ve hızı ile sürme direncine bağlı olduğu görülmüştür. Ayrıca, kondansatör değerinin gereğinden fazla artırılması, boşta çalışmada iletme girme esnasında aşırı akım geçmesine ve kapıda oluşan aşırı gerilimle IGBT'nin tahrip olmasına neden olmaktadır. Paralel bastırma kondansatörü değerinin, IGBT'nin hızı ve sürme direnci ile katalogta verilen maksimum akımına göre seçilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

#### Kaynaklar

- [1] H.Bodur, A.F.Bakan, "A New ZVT-ZCT-PWM DC-DC Converter", IEEE Trans. Power Electron., vol.19, pp.676-684, May 2004.
- [2] A.F. Bakan, H. Bodur, and İ. Aksoy, "A Novel ZVT-ZCT PWM DC-DC Converter", 11th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE2005), Dresden, September 11-14, 2005.
- [3] H.Bodur, A.F.Bakan, "An Improved ZCT-PWM DC-DC Converter for High-Power and Frequency Applications", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol.51, no.1, pp.89-95, February, 2004.
- [4] H.Bodur, A.F.Bakan, "A New ZVT PWM DC-DC Converter", IEEE Transactions on Power Electronics vol.17, no.1 pp.40-47, January, 2002.
- [5] R. Redl, L. Balogh, and D. W. Edwards, "Optimum ZVS full-bridge dc/dc converter with PWM phase-shift control: Analysis, design considerations, and experimentation," in IEEE-APEC Conf. Rec., 1994, pp. 159-165.

- [6] S. Hamada and M. Nakaoka, "Analysis and design of a saturable reactor assisted soft-switching full-bridge dc-dc converter," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 9, pp. 309–317, May 1994.
- [7] J. G. Cho, "IGBT Based Zero Voltage Transition Full Bridge PWM Converter For High Power Applications," *IEEE Trans. Electr. Power Appl.*, vol. 143, pp. 475–480, Nov. 1996.
- [8] S. Jeon, and G.H. Cho, "A zero-voltage and zero-current switching full bridge DC-DC converter with transformer isolation," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 16, pp. 573–580, Sept. 2001.
- [9] C. Iannello, S. Luo, I. Batarseh, "Full bridge ZCS PWM converter for high-voltage high-power applications," *IEEE Trans. Aero. and Electr. Sys.* Vol. 38, Apr. 2002
- [10] E. Kim and Y. Kim, "A ZVZCS PWM FB DC/DC Converter Using a Modified Energy-Recovery Snubber," *IEEE Trans. Industrial Electron.*, vol. 49, pp. 1120–1127, Oct. 2002.
- [11] G. Koo, G. Moon, and M.Y. Youn, "New zero-voltage-switching phase-shift full-bridge converter with low conduction losses," *IEEE Trans. Industrial Electron.*, vol. 52, pp. 228–235, Oct. 2002.
- [12] Y. Jang, M. M. Jovanovic, and Y. Chang, "A new ZVS-PWM full-bridge converter," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 18, pp. 1122–1129, Sept. 2003.