



Yeni Nesil Yüksek Güçlü IGBT'ler İçin Dinamik Modelleme ve Deneysel Doğrulama

Dynamic Modelling and Experimental Validation of New Generation High Power IGBTs

Osman Tanrıverdi^{1*} , Deniz Yıldırım² 

¹TÜBİTAK Raylı Ulaşım Teknolojileri Enstitüsü, Elektrikli Tahrik Sistemleri Grubu, Kocaeli, Türkiye

²İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

Öz

Bu çalışmada, karakterize edilmiş IGBT dinamik modelleme yapılmıştır. Bu dinamik modelleme için IGBT bilgi dokümanı kullanılmıştır. Kurulan model IGBT çift darbe test devresinde denenmiştir. Sonuçlar deneysel çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Bu çalışmanın temel amacı yüksek güçlü çeviricilerle yapılan benzetim çalışmalarında sonuçların özellikle iletim ve kesime geçiş anlarında gerçeğe yakın olmasını sağlamaktır. Yine IGBT kapı sürme devresi tasarım aşamasında da model, algoritmanın benzetim ortamında geliştirilmesi esnasında fayda sağlayacaktır. Benzetimlerde ANSYS Simplorer programı kullanılmıştır. Modelleme için yeni nesil yüksek güçlü IGBT modülü olan MBM450FS33F model Hitachi marka IGBT seçilmiştir. Bu ürün yeni paket çift IGBT'li modül olup yüksek güç yoğunluğu, düşük endüktans ve kolay paralellenebilir özellikleriyle yüksek güçlü çeviricilerde tercih edilmektedir. Deneysel sonuçlar kurulan çift darbe test düzeneği üzerinden alınmıştır. Benzetim ve deneysel çalışmalar arasındaki farklar grafik ve çizelgelerle verilmiş, program üzerinde yapılan IGBT modelin gerçek modül ile yakınlığı anahtarlama enerjisi hesaplamaları ile de kontrol edilmiştir. Sonuçlar kurulan modelin gerçeğe yakın olduğunu, bu modelin kullanıldığı sistem benzetimlerinde uygulanabilir olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: IGBT modelleme, IGBT kayıpları, Yüksek güçlü IGBT, Çift darbe testi, Model doğrulama

Abstract

In this paper, IGBT dynamic model is characterized by the circuit simulation tool. IGBT datasheet is used for the details need to built dynamic model. After that, the model is used in the double pulse test circuit simulation. And the results compared with the real test results. Main idea of this research is to have an IGBT dynamic model as close as possible to real one in order to use the model in the gate drive design simulations. A software tool of Ansys Simplorer is used for the simulations and the IGBT that is used for the research is MBM450FS33F. This is the new packaging generation high voltage dual IGBT that has the feature of high power density, low inductance and easy paralleling for the converter applications. Experimental test measurements are also performed with double pulse test setup. The comparison of the simulation and the experiment results for both voltage and current waveforms, especially peak values and the turn off and turn on energy losses are given in detail. The results are shown that the dynamic IGBT model that is built can be used for the system simulations. It achieves an acceptable accuracy considering the compared results.

Keywords: IGBT modelling, IGBT losses, High power IGBT, Double pulse test, Model verification

1. Giriş

Günümüzde IGBT anahtarlama elemanları yüksek güçlü güç elektroniği çeviricilerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Yüksek akım ve gerilim altında anahtarlanmaları, bu anahtarların

güvenilir bölgede çalışmalarını kritik hale getirmiştir. Güç çeviricileri uygulamalarında öncelikli olarak devre benzetim programları ile çalışılması, özellikle güç katı tasarımının ve kontrol algoritması tasarımının vazgeçilmezidir. Bu, tasarımcılara hem zamanda kolaylık, hem de gerçek sistemde oluşacak risklerin önceden görülmesini ve gerekli aksiyonların alınmasını sağlamıştır. Bu sistemlerde, özellikle yüksek gerilim ve akım altında anahtarlama geçişlerinde oluşabilecek gerilim ve akım aşımalarını görebilmek için günümüzde güç elektroniği elemanlarının dinamik modelinin oluşturulması elzemdir. IGBT anahtarlama elemanlarının

*Sorumlu yazarın e-posta adresi: osman.tanriverdi@tubitak.gov.tr

Osman Tanrıverdi  orcid.org/0000-0002-7234-0456

Deniz Yıldırım  orcid.org/0000-0001-6216-6290



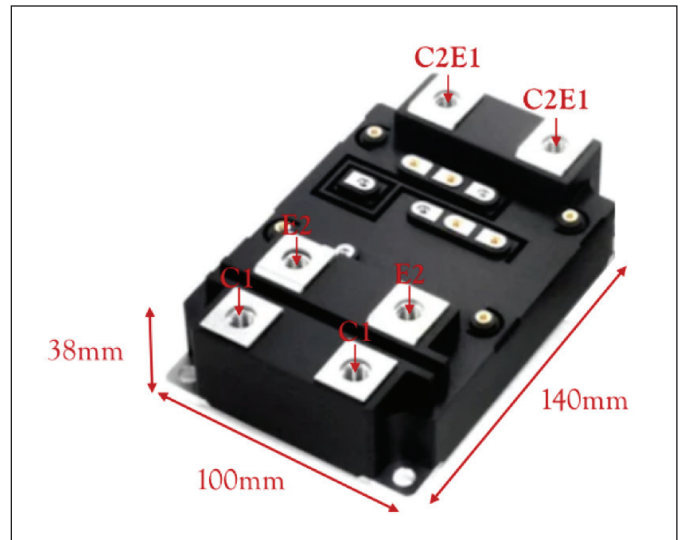
dinamik modeli ile gerçekte sistemin güvenilir aralıkta çalışmasını benzetim programı ile önceden kestirilebilmek mümkündür. Literatürde farklı komplekslikte, farklı IGBT elemanlarının modelleme çalışmaları yapılmıştır (Sheng vd 2000). Bu modelleme çalışmalarının farklılığı, modelin kullanılacağı uygulamaya göre değişmektedir. Çoğu devre benzetim programlarının kendi kütüphanelerinde standart IGBT modeli bulunur. Fakat bu modeller genel IGBT modeli olup, sürekli hal için uygundur. Dinamik (kesime ve iletme girme) geçişlerde gerçek durumdan ciddi anlamda uzak davranırlar. IGBT modelleri genel olarak matematiksel ve davranışsal modeller olarak ikiye ayrılmaktadırlar (Ji vd 2012). Bu çalışmada davranışsal modelleme tekniği bir benzetim programı üzerinden yapılmış, IGBT modülün kapasitif ve endüktif elektriksel parametreleri ile birlikte akım-gerilim-enerji grafikleri girilmiş, detay parametrelerin çıkartılması programa bırakılmıştır. Bu da çalışmanın diğer modelleme tekniklerine göre daha pratik bir yöntem olmasını sağlamıştır. Ayrıca diğer modelleme çalışmalarına göre oluşturulan modelin gerçek model ile deneysel olarak nasıl karşılaştırılacağı basitçe sunulmuş, yüksek güçlü çeviricilerde anahtarlama geçişlerinde önemsenerek kritik akım-gerilim ve zaman bilgileri detaylı verilmiştir.

Bu çalışmanın temel amacı, ürün bilgi dokümanına göre karakterize edilmiş IGBT modelin benzetimdeki davranışı ile gerçek sistemdeki davranışını karşılaştırmaktır. Bu sayede modelde kullanılan IGBT modülün, özellikle anahtarlamanın geçiş anlarında gerçeğe ne kadar yakın olduğu ölçülmüş olur. Çalışmada öncelikle IGBT komponentinin bilgi dokümanı verileri kullanılarak iletme geçiş ve kesime geçiş anlarındaki davranışının parametresel modellenmesi yapılmıştır. Modelleme ve devre benzetimleri için ANSYS Simplorer benzetim programı kullanılmıştır. Bilgi dokümanı grafikleri ve termal veriler adım adım girilmiş ve model oluşturulmuştur. IGBT modelinin gerçeğe ne yönde ve ne kadar yakın olduğunun önemi kullanıldığı uygulamaya göre değişkenlik gösterir. Bu çalışma ile oluşturulan model, güç elektroniği güç çeviricileri tasarımında kullanılarak çeviricinin anahtarlama anında güvenilir bölgede (SOA) çalışıp çalışmadığını gerçek sistemi kurmadan benzetim programı ile önceden anlamaya yeterlidir. IGBT sürücü devresi tasarımı için de bu model kullanılabilir. Özellikle anahtarlama geçişlerindeki dalga biçimlerini gerçeğe yakın görmek, sürücü kontrol algoritmasını yüksek gerilim ve akım altında deneysel çalışmalar öncesinde analiz edebilmeyi elverişli kılar. Fiziksel komponent parametrelerine göre matematiksel modeller oluşturmaya gerek duymaksızın amaca uygun IGBT modeli bu çalışmada gerçekleştirilmiştir.

Bu dinamik model anahtarlama geçiş anlarını görmek için yeterli seviyededir.

Oluşturulan modelin gerçeğe yakınlık derecesine her iki ortamda kurulan çift darbe test devresi ile bakılmıştır. Bunun için gerçekte alınan anahtarlama grafikleri ve bu grafiklerden elde edilen verilerle hesaplanan anahtarlama enerjileri, oluşturulan modelin kullanıldığı benzetim devresinden alınan grafik verileri ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar yüzde sapma şeklinde çizelge ile verilmiştir. Ayrıca, özellikle IGBT kesime geçiş sırasında sistemdeki kaçak endüktanstan dolayı DC baraya yansıyan gerilim sıçramasının miktarı da elde edilen grafiklerle karşılaştırılmıştır.

Bu çalışmanın bir diğer amacı da Şekil 1'de görülen 2017 yılının ikinci yarısında IGBT üreticilerinin ticari olarak piyasaya sürdüğü yeni paketleme tipinde 3300V 450A çift IGBT'li modüllerin modellenmesi ve deneysel olarak incelenmesidir. Bu çalışmada nHPD² ailesi Hitachi marka MBM450FS33F (MBM450FS33F datasheet, 2017) model IGBT için dinamik model kurulup ilk defa piyasaya sürülen bu modüllerin anahtarlama testleri hem deneysel olarak hem de benzetim ortamında gerçekleştirilmiştir. nHPD² ailesi bu modüllerin iç yapısındaki silikon ve iletkenlerdeki iyileştirmeler ile birlikte bir takım avantajları bulunmaktadır. Modülün iç endüktansı aynı gerilim sınıfı tekli IGBT modüllere göre %75 azaltılmıştır. Güç yoğunluğu ise yine tekli yüksek güçlü modüllere göre %10 oranında artmıştır. Bu modüller yüksek güçlü çevirici sistemlerinde paralellenebilir modülerlikte kullanılmaya uygundur. Burada; P ve N güç terminallerinin bir tarafta, AC terminalin de fiziksel olarak bu girişlere karşı tarafta olması yapısal anlamda



Şekil 1. Yeni nesil 3300V 450A-600A IGBT modül paketi.

paralellenmesine olanak sağlamaktadır. Ayrıca bu yapı ile birlikte, evirici sistemlerinde DC bara kondansatörleri ve yük bağlantıları kolaylıkla yapılabilmektedir (Kawase vd 2015).

2. Gereç ve Yöntemler

2.1. Modelleme

IGBT modelleme için ANSYS Simplorer programı ile ürün bilgi dokümanı verileri kullanılarak aktif komponentler modellenmektedir (Oustad vd 2016). Programda 3 farklı IGBT modül seviyesinde modelleme yapılmaktadır: Ortalama IGBT Model, Temel Dinamik IGBT Model ve Geliştirilmiş Dinamik IGBT Model. Ortalama IGBT modelde IGBT statik modelleme yapılabilmekte olup geçiş durumları dinamik olarak modellenmemektedir. Bu çalışmada kullanılan Temel Dinamik model, IGBT anahtarlama geçişlerinin benzetimde görülebildiği dinamik bir modeldir. Bu çalışma kapsamında yeterli olduğu için bu modelleme tipi seçilmiştir. Bu modele IGBT bilgi dokümanında bulunan tüm akım-gerilim ve termal grafiklerin girilebildiği gibi, modül için kapasite ve endüktans bilgileri de parametresel bir girdi olarak kullanılmaktadır.

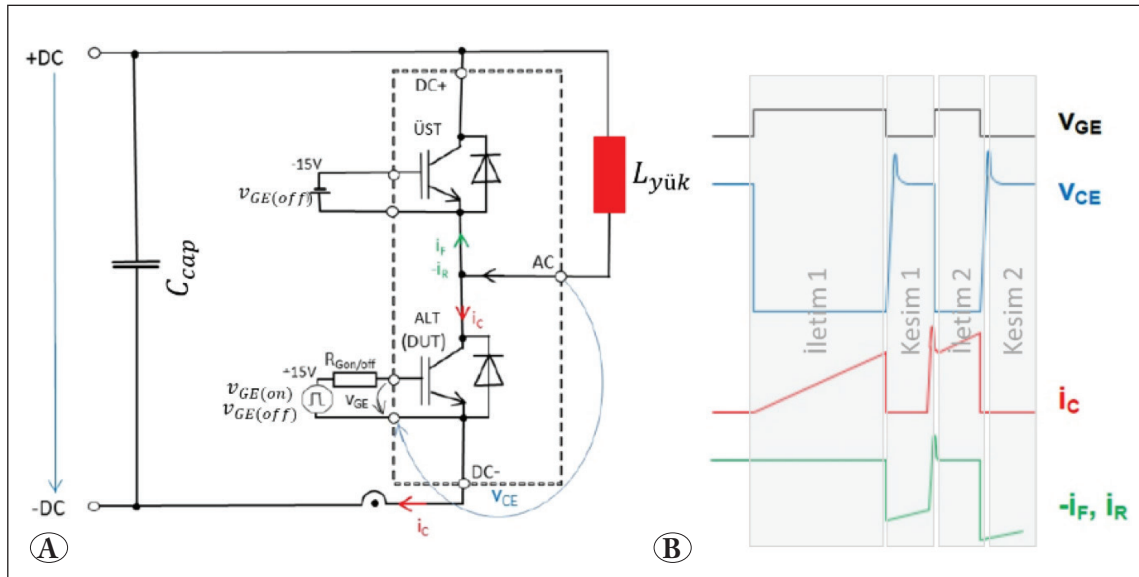
Temel dinamik modelleme 11 basamaktan oluşmaktadır. İlk bölümde IGBT anahtarlama nominal gerilim ve akım değerleri, IGBT kapı gerilim değerleri, IGBT kapı giriş ve Miller kapasite değerleri girilmiştir. İkinci bölümde kollektör-emiter güç terminal direnç ve endüktans değerleri, kapı sürme direnç değerleri girilmiştir. Üçüncü bölümde IGBT bilgi dokümanından $i_C - v_{GE}$ grafik değerleri, sonraki bölümde $i_C - v_{CE}$ grafik değerleri girilmiştir.

Beşinci bölümde $i_F - v_F$ diyot iletimsel grafik değerleri, sonraki bölümlerde ise IGBT ve paralel ters diyotun termal empedans değerleri girilmiştir. Diğer bölümlerde ise program IGBT modülün analitik detay parametrelerini oluşturmaktadır.

2.2. Çift Darbe Test Düzenegi

Anahtarlama benzetim ortamında ve deneysel ortamda yapılmıştır. Buna göre dalga şekilleri çıkartılmış ve maksimum noktalar karşılaştırılmıştır. Deneysel testler günümüzde IGBT dinamik davranışlarını nominal gerilim ve akım değerlerinde test etmeye olanak sağlayan ve Şekil 2'de görülen "Çift Darbe Test Devresi" üzerinde yapılmıştır. Bu test metodu ile IGBT'lerin hem kesime geçiş hem de iletme geçiş durumlarında yaşanan değişimler tek bir ölçüm aralığında görülebilmektedir (Musikka vd 2013). Bu değişim durumlarında IGBT'ler nominal gerilim-akım değerlerinde DC bara kondansatörlerinden çekilen enerji ile çalıştırılmış olmaktadır.

Çift darbe test devresinde endüktif yük kullanılır, üst IGBT'nin diyot elemanı endüktif yükün enerjisini alt IGBT kesime girdiğinde kendi üzerinden boşaltır. Alt IGBT elemanı 2 kere iletme ve kesime sokulur. Verilen ilk darbeye kollektör akımı belirli bir i_C değerine erişir. Sisteme bağlanan yükün endüktans değeri alt IGBT kesim durumunda akımın fazla değişmemesi için yeterince büyük olmalıdır. İkinci darbe PWM işareti ile alt IGBT ikinci kez iletme girer. İletime girdiği anda ilk etapta sistemden üst IGBT diyotundan dolayı tersine toparlama akımı akar. Bunun nedeni, iki darbe arası kesim esnasında üst IGBT



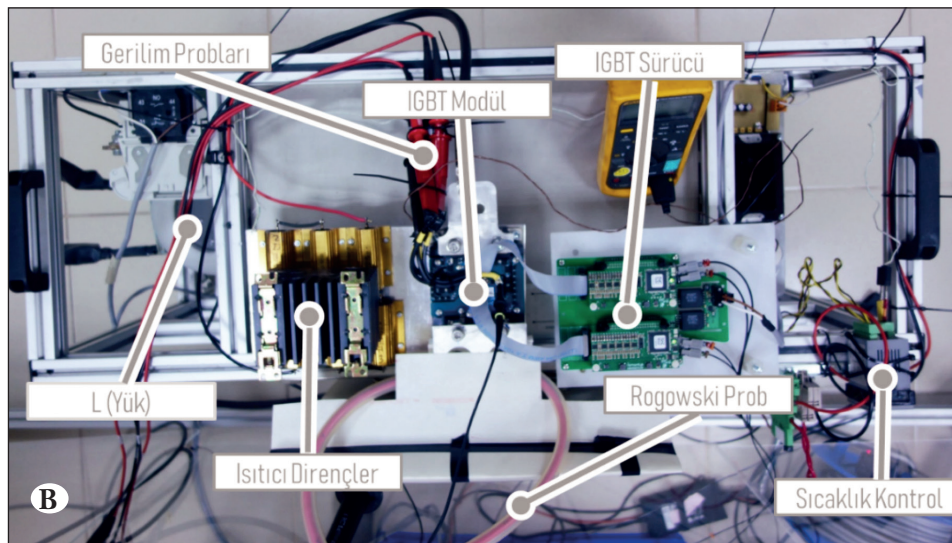
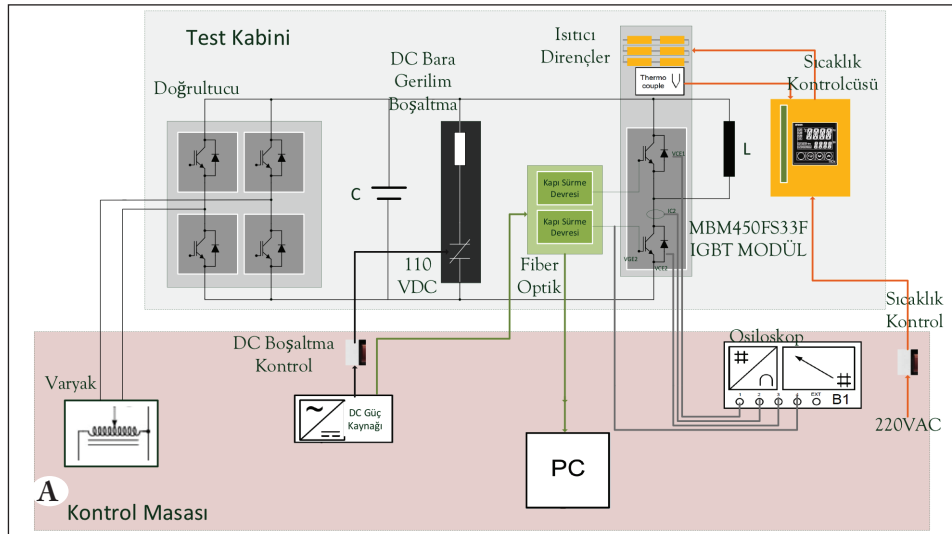
Şekil 2. IGBT çift darbe test devresi
A) Devre şeması
B) Çift darbe dalga şekilleri.

diyotu endüktif yükün enerjisini iletim yönünde tükettiği, yani iletim yönünde akım akıttığı, ikinci darbe ile kesime gitmesi gerektiği noktada ters toparlanma akımının DC pozitif-negatif yönünde akım akıtmasıdır. Ters toparlanma bittiği anda akım sıfırdan değil ilk darbeye akımın yükseldiği noktadan tekrar akmaya başlayarak yükün endüktans değerine ve iletim süresine bağlı olarak artış gösterir. İkinci gerilim darbesi sonunda IGBT kesime gittiği sırada sistemdeki endüktif etkiden dolayı alt IGBT kollektör-emiter geriliminde (V_{CE2}) aşım görülür.

Bu çalışma için kurulan test düzeneği Şekil 3A'da görüldüğü üzere 2 ayrı bölümden oluşmaktadır: 1) Test kabini 2) Kontrol masası. İlgili beslemeler ve kontrol birimleri yüksek gerilimin olduğu test kabininden izole şekilde konumlandırılmıştır. Deney düzeneği için hazırlanan çift darbe test güç katı Şekil 3B'de detayları ile verilmiştir. DC

bara gerilimi bir varyak ile doğrultucu üzerinden DC bara kondansatörünü doldurmak suretiyle oluşturulmaktadır. Doğrultucu biriminde IGBT modüllerin paralel diyotları kullanılmıştır. Testi yapılan IGBT modülü DC bara kondansatörüne geniş sandviç bara ile bağlanmıştır. DC bara geriliminin kondansatör üzerinden kısa zamanda boşalması için direnç ile kontaktör seri bir şekilde baraya bağlanmış olup kontrolü bir buton yardımıyla 110VDC güç kaynağı üzerinden yapılmaktadır. IGBT anahtarlama elemanını istenilen sıcaklıkta test edebilmek için sıcaklık şartlandırma devresi de sisteme entegre edilmiştir. Kullanılan tüm elemanlar Çizelge 1'de listelenmiştir.

Deneysel çalışmada IGBT anahtarlama elemanı, 25 derece ve 125 derecede Amantys marka ZP33NP1 model IGBT sürücüsü ile anahtarlansmıştır. Bunun için IGBT modülü soğutucu plakaya ısıtıcı dirençler ile bağlanmıştır.



Şekil 3. Çift darbe test güç katı düzeneği
A) Blok şema
B) Deneysel ortam.

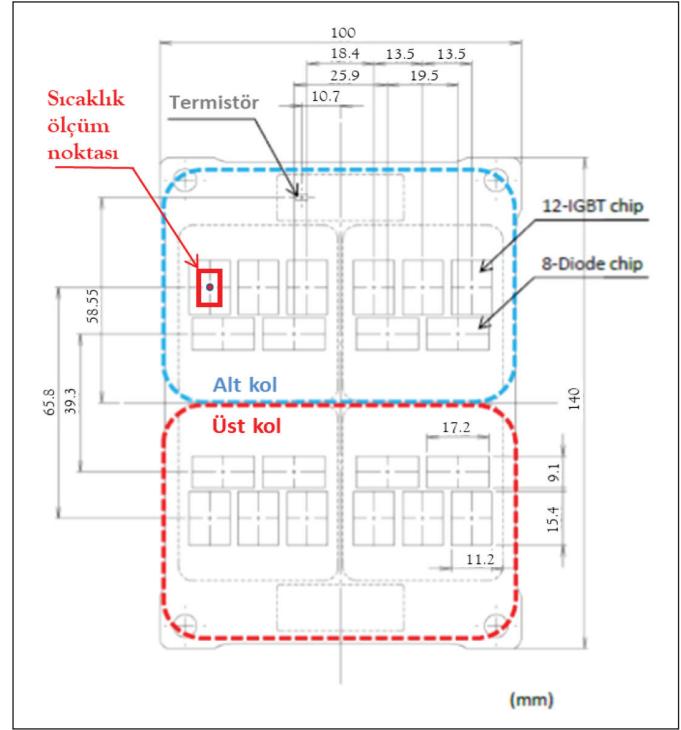
Sıcaklık şartlandırılmış, IGBT tabanı kontrollü şekilde 125 dereceye ısıtılmıştır. Buna göre bir adet sıcaklık kontrolcüsü yardımıyla ısıtıcı dirençler kullanılarak IGBT'nin tabanının bağlanmış olduğu alüminyum plaka kontrollü bir şekilde ısıtılmaktadır. Alüminyum plakada ısıtıcı dirençlerin altına bağlanan termokupl yardımıyla istenen sıcaklık değerinde sabit tutulmaktadır. IGBT sıcaklığı ise ayrı bir sıcaklık probu ile ölçü aleti üzerinden okunmaktadır.

IGBT modülün ısıtılmasında kritik nokta modül içi çip bölgesine en yakın noktanın tespiti, yani o noktanın sıcaklığının bilinmesidir. MBM450FS33F IGBT modül içerisinde 12 adet IGBT çip, 8 adet de diyot çip bulunmaktadır. Şekil 4'de modül içerisindeki çiplerin yerleşimi görülmektedir. Modül içerisindeki IGBT çiplerinin kırmızı kare içine alınmış olan birimin altından sıcaklık ölçülmüştür.

Dinamik modelin IGBT iletim ve kesime geçiş durumlarını analiz edebilmek için Şekil 5A'daki çift darbe test devresi oluşturulmuştur. Benzetim ortamında kurulan devrede kapı dirençleri gerçekte olduğu gibi iletim ve kesim için iki ayrı direnç şeklinde eklenmiştir. Kapı gerilimi ve sürme dirençleri IGBT dokümanında verilen değerlerde benzetime girilmiştir. Sistemdeki endüktif yük seri endüktör ($L_{yük}$) ve direnci ($R_{yük}$) şeklinde modellenmiştir. Gerilim ise çift darbe testinde yapıldığı üzere iki darbe şeklinde verilmiştir.

Çift darbe test sisteminde kaçak endüktans 5 ayrı endüktör kaynaklı oluşmaktadır: DC bara kondansatörü iç endüktörü

(L_{cap}), sistem (+) bara endüktörü (L_{poz}), sistem (-) bara endüktörü (L_{neg}), üst IGBT endüktörü L_{IGBT1} , alt IGBT endüktörü L_{IGBT2} . Bara endüktör yolları Şekil 5B'de görülmektedir.



Şekil 4. MBM450FS33F IGBT modül içi çip yerleşimi (Üretici firmadan özel alınmıştır).

Çizelge 1. Çift darbe test düzeneği malzeme listesi (Test Kabini (1), Kontrol Masası (2)).

Malzeme/Ekipman	Model/Ürün Kodu
Doğrultucu (1)	4 adet MBN1500E33E2 IGBT modülü
DC Bara Kondansatörü (1) (1)	Electronicon E56.N37-465790, 4600 μ F 2000VDC
IGBT (1)	Hitachi MBM450FS33F, 3300V 450A
IGBT Sürücü (1)	Amantys ZP33NP1 model sürücü
Yük Bobini (1)	100uH 3000A/5ms
DC Boşaltma Kontaktörü (1)	Microelectrica Scientifica LTC 250, 1500VDC 250A
DC Boşaltma Direnci (1)	Tyco Electronics, 22ohm 1kW
Isıtma Dirençleri (1)	Arcol, 10ohm 100W
Sıcaklık Kontrolcüsü (1)	ENDA ETC 442
Gerilim Probu (1)	Tektronix THDP0100
Rogowski Akım Probu (1)	PEM CWT 30R
Varyak (2)	0-220VAC/0-2800VAC
Multimetre (2)	Fluke 87V
Osiloskop (2)	Tektronix MSO 4104
Güç Kaynağı (2)	GWInstek SPD-3606

$$L_{kaçak} = L_{poz} + L_{IGBT1} + L_{IGBT2} + L_{neg} + L_{cap} \quad (1)$$

Sistemde bulunan kaçak endüktans, deneysel olarak IGBT iletim ya da kesime geçiş esnasındaki grafiklerinden hesaplanabilmektedir (Volke ve Hornkamp 2015). Burada kesime geçiş anındaki anahtarlama dalga şekillerinden hesaplama yapılmıştır. Anahtarlama testi sonucunda hesaplanan endüktans, kapama anındaki alt IGBT kollektör-emiter gerilim sıçraması ve alt IGBT kollektör akımı değişimi kullanılarak hesaplanmıştır.

Alt IGBT uçları üzerinden gerilim sıçraması görmek DC baradaki gerilim sıçramasını görmekten daha sağlıklı bir ölçümdür. Çünkü ölçümlere göre IGBT üzerindeki gerilim sıçramasının değeri DC baradaki gerilim sıçramasının

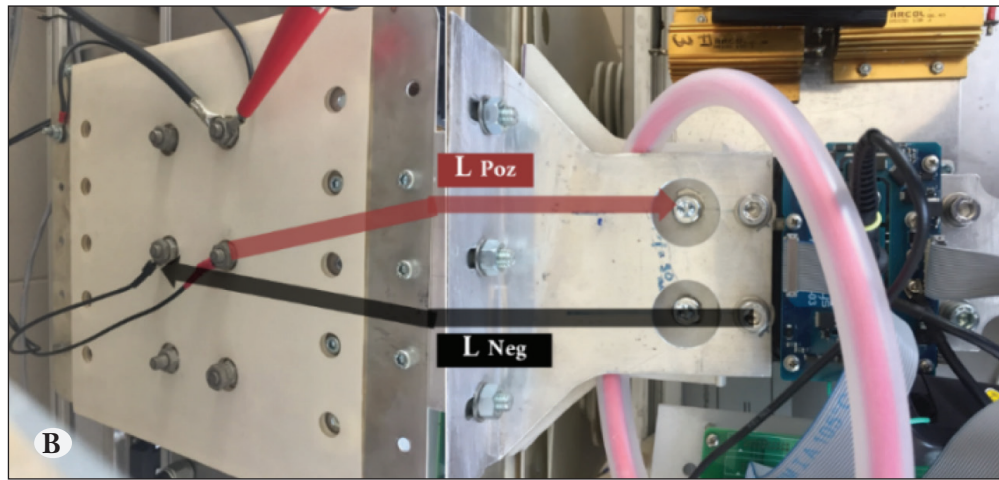
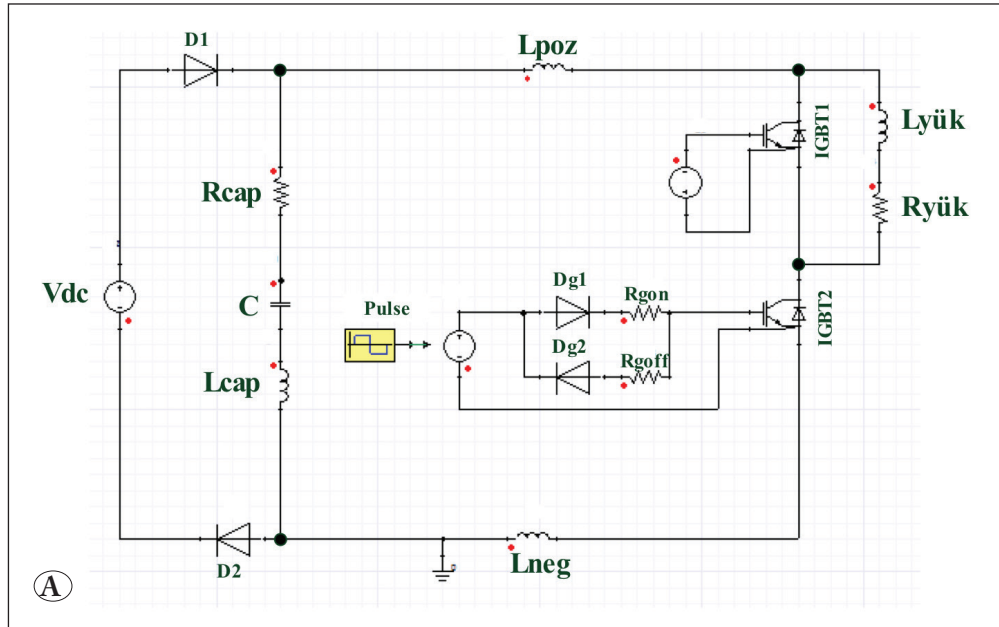
yaklaşık 2 katıdır. Sistemin endüktansı aşağıdaki Denklem 2 yardımıyla hesaplanmıştır. Burada “ L ” endüktans, “ v_{CE} ” IGBT₂ kollektör-emiter gerilimindeki anlık yükselme ve “ d_j/dt ” IGBT₂ kollektör akımının zamanla değişimidir.

$$v_{CE} = L \times di_c / dt$$

$$220V = L \times \frac{358A}{148ns} \quad (2)$$

$$L_{kaçak} = 90nH$$

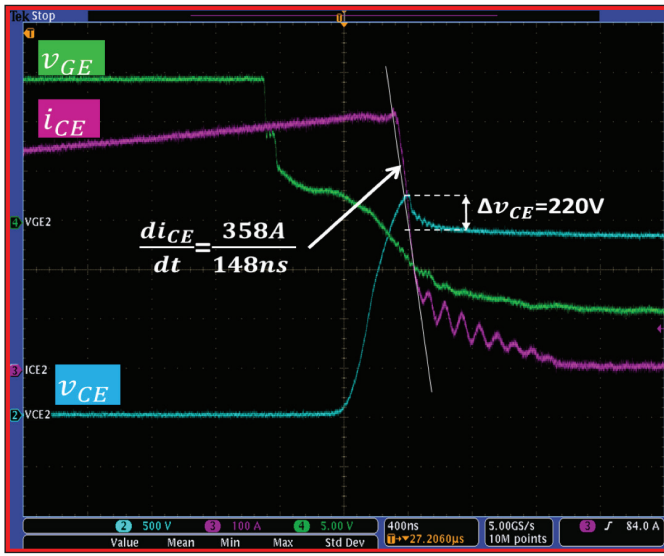
Buna göre deneysel çalışmalardan alınan Şekil 6'deki dalga şekilleri üzerinden yapılan hesaplamalarda kaçak endüktansın yaklaşık $90nH$ olduğu görülmüştür ve benzetimde bu değer toplamda $90nH$ olarak Şekil 5'de



Şekil 5. A) Benzetim ortamında kurulan çift darbe test devresi (B) Bara endüktör yolları.

Çizelge 2. Çift darbe testi güç elemanları elektriksel parametreleri.

Parametre	Değer
R_{cap}	500 $\mu\Omega$
$L_{kaçak}$	90nH
C_{cap}	4600 μ F
$L_{yük}$	100 μ H
$R_{yük}$	2m Ω
V_{dc}	1800V



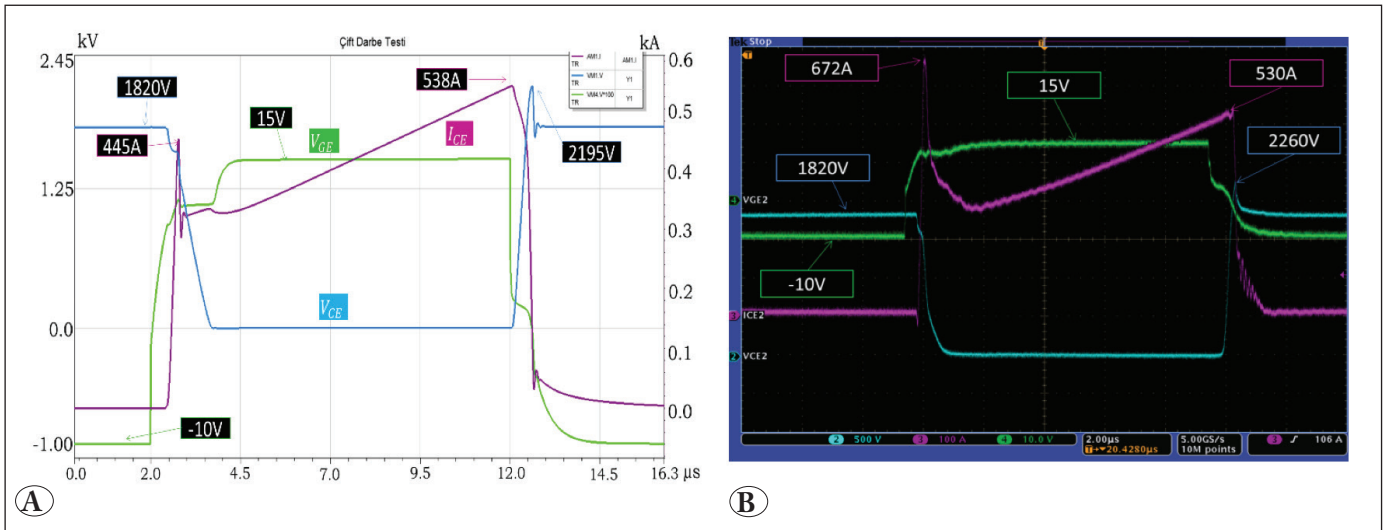
Şekil 6. Deneysel ortamda IGBT kesime geçiş anında dalga şekilleri (DC bara gerilimi $V_{DC}=1800V$, Kollektör akımı $I_C=450A$, Kapı direnci $R_g=12\text{ ohm}$).

benzetim devresindeki endüktörlere girilmiştir. Devrede kullanılan güç elemanlarının elektriksel parametreleri Çizelge 2'de verilmiştir.

3. Bulgular

IGBT dinamik modelleme ile IGBT elemanının anahtarlama geçiş anlarında gerçek sisteme yakın sonuçlar çıkarması beklenmektedir. Bunun için dalga şekilleri her iki ortamda da incelenmiştir. Modelin doğruluk yakınsaması için ilk kriter anahtarlama geçiş anlarında IGBT akım ve gerilim aşım değerlerinin deneysel ve benzetim ortamlarında birbirine yakın çıkmasıdır. IGBT iletme geçiş esnasında IGBT paralel diyotu ters toparlanmasından dolayı oluşan akım aşımı ve IGBT kesime geçiş esnasında sistem kaçak endüktanstan dolayı oluşan gerilim aşımı bahsi geçen elektriksel zorlanma faktörleridir. Burada kesime geçiş esnasında oluşan gerilim aşımı sistemde daha kritik problemler doğurabilmektedir. Bu yüzden akım aşımına göre daha fazla öneme sahiptir. Güç elektroniği güç çeviricilerinde DC baraya bağlı olan bara kondansatörleri belirli bir gerilim dayanımına sahiptir. Bu sistemlerde en büyük arıza oranı olan komponent bara kondansatörleri olduğundan (Choi vd 2015), gerilim sıçramasının tepe değeri kondansatörlerin zarar görmemesi açısından önem arz etmektedir.

Her iki durumdaki çalışmada da Şekil 7'de görüldüğü gibi özellikle IGBT kesime geçiş durumunda akım ve gerilim tepe değerleri birbirine çok yakındır. Akım ve gerilim grafiklerine bakıldığında, IGBT kesim durumunda testlerde



Şekil 7. IGBT 2. anahtarlama darbesi dalga şekilleri (mavi: Kolektör-emiter gerilimi (V_{CE}), mor: Kolektör akımı (I_{CE}), yeşil: Kapı gerilimi (V_{GE})) **A)** Benzetim ortamında dalga şekli **B)** Deneysel ortamda dalga şekli.

gerilim **2260V**'a çıkarken, benzetimde **2195V**'a kadar aşım yapmıştır. Bu da yaklaşık %3'lük bir fark olduğunu gösterir. Bu fark esnasında benzetim esnasında yapılacak algoritmanın IGBT'nin güvenli bölgede çalışıp çalışmadığı konusunda bize gerçek çalışmaya göre çok yakın sonuç vermektedir. Bunun dışında, IGBT iletim esnasında üst IGBT'nin ters toparlanma akımından dolayı aşım yapan kollektör akımının tepe değeri gerçek testlerde **670A** iken benzetim sonuçlarında **455A** olarak görülmüştür. Bunun nedeninin de IGBT üzerindeki diyotun modellemeye yalnızca $i_F - v_F$ grafiğinin girilebildiği, dinamik davranışının modellenmesinde benzetim programının performansının düşük olmasıdır.

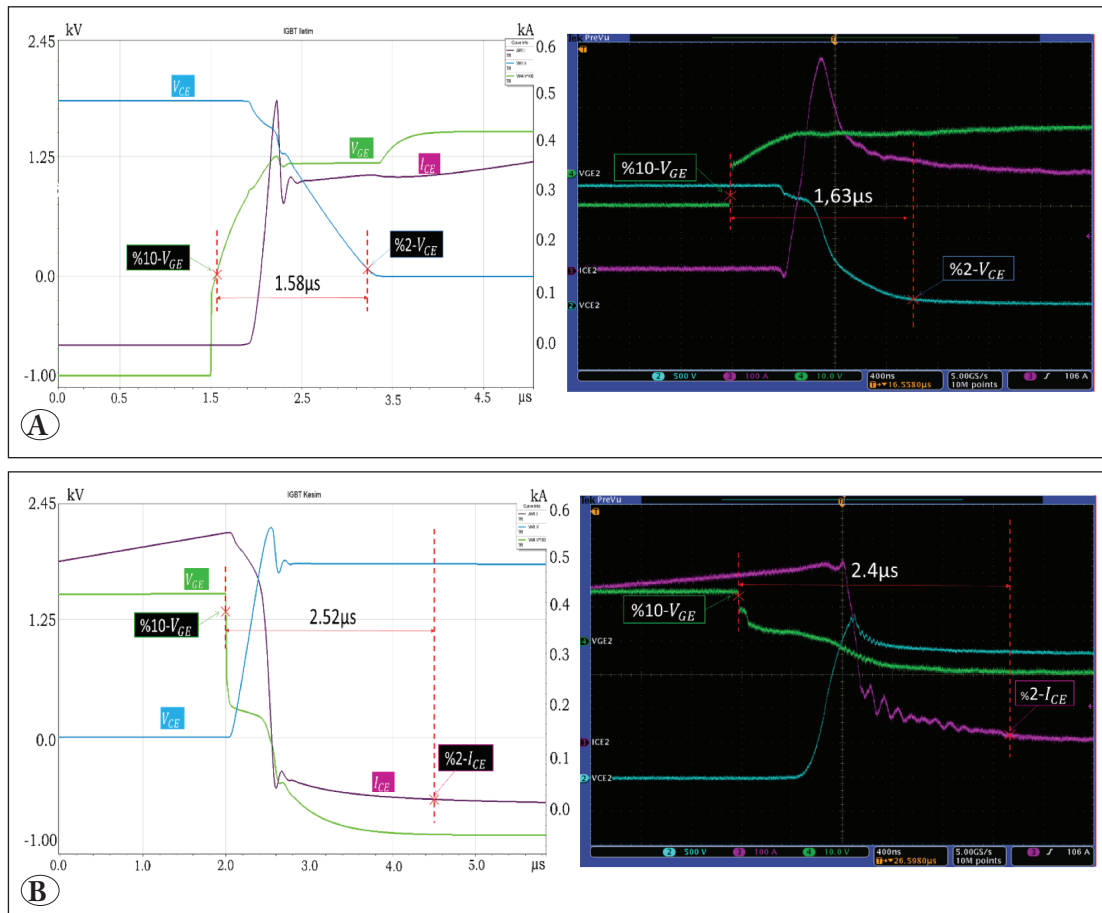
Anahtarlama ölçümlerinde enerji hesaplamaları IEC 60747-9 standardına göre Denklem 3'deki kayıp hesaplarıyla yapılmaktadır (IEC 60747-9:2007, AN1403 Semikron App. Note). Bu standarda göre enerji integral limitleri akım-gerilim büyüklüklerinin belirli yüzdeleridir.

$$E_{on} = \int_{t_1}^{t_2} v_{CE}(t) \cdot i_C(t) dt \quad E_{off} = \int_{t_3}^{t_4} v_{CE}(t) \cdot i_C(t) dt \quad (3)$$

İntegral limitleri iletim geçişi için $t_1, v_{GE(on)}$ 'un %10'u, $t_2, v_{GE(on)}$ 'un %2'si, kesime geçiş için $t_3, v_{GE(off)}$ 'un %90'ı, $t_4, i_{C(on)}$ 'un %2'si olarak alınır.

IGBT iletim ve kesim durumlarında deneysel çalışma ve benzetim çalışmasında grafiklerden enerji kayıpları hesaplamak için yukarıdaki standarda göre zaman aralıkları belirlenmiştir. Buna göre Şekil 8'de görüldüğü üzere iletime ve kesime geçiş süreleri yaklaşık aynı çıkmıştır. Çizelge 3'de verilen bu sonuçlara göre her iki ortamda IGBT anahtarlama kayıp hesaplarının karşılaştırması yapılabileceği görülmektedir.

IGBT benzetim modelinin doğrulanması için bir diğer kriter de anahtarlama geçişleri esnasındaki enerji kayıp hesaplarının karşılaştırılmasıdır. Enerji hesapları, IGBT iletime ve kesime geçiş aralıklarında 25 ve 125 °C sıcaklıkları için 1800VDC v_{CE} gerilimi ve 100-500A i_C akım kademelerinde anahtarlama dalga şekilleri üzerinden yapılmıştır. Bunun için benzetim ve deneysel ortamlarda elde edilen dalga şekilleri kullanılarak IEC 60747-9:2007 standardında verilen zaman aralıkları içerisinde ".csv"



Şekil 8. IGBT benzetim ve deneysel ortamda dalga şekilleri. (mavi: Kolektör-emiter gerilimi (V_{CE}), mor: Kolektör akımı (i_C), yeşil: Kapı gerilimi (V_{GE})) **A)** İletime geçiş anında **B)** Kesime geçiş anında.

dosyası ile 10000 ölçüm verisi alınmıştır. Gerilim ve akım değerleri çarpılmış, enerji hesabı için standarda göre belirlenen integral limitleri baz alınmıştır.

Deneysel verilerde kollektör akımını ölçmek için kullanılan Rogowski akım probunun bir gecikmesi mevcuttur. CWT 30R akım probunun kablo uzunluğu 4 m, bobin uzunluğu ise 70 cm'dir. Akım probunun yüksek frekans Bode diyagramı üzerinden görülen yüksek frekansta 40ns'lik bir faz kayması oluşmaktadır ve bu gecikme hesaplara katılmıştır (CWT Technical Note 2011). Buna göre enerji hesapları ve iki farklı ortamın sonuçlarındaki hata yüzdeleri Çizelge 4'deki gibi çıkarılmıştır. Şekil 9'da ise akıma bağlı enerji kayıpları farklı sıcaklıklarda grafiksel olarak verilmiştir.

Görüldüğü gibi nominal çalışma koşullarından düşük güç yönünde uzaklaştıkça hata payı büyümektedir. Fakat önemli olan IGBT anahtarlama elemanının sınır çalışma değerlerinde benzetim ve deneysel verilerin yakınsadığının görülmesidir. Sistemin güvenli bölgede çalışması bu bölgeler için kritiktir. Bununla birlikte IGBT kesime geçiş durumunda gerçek ölçümlerde akımın belirli bir değerden sonra daha yavaş sönümlenmesinden dolayı E_{off} enerji kayıpları benzetimdekinden daha yüksek çıkmıştır.

4. Tartışma

Bu çalışmada yüksek güçlü bir IGBT modülün benzetim

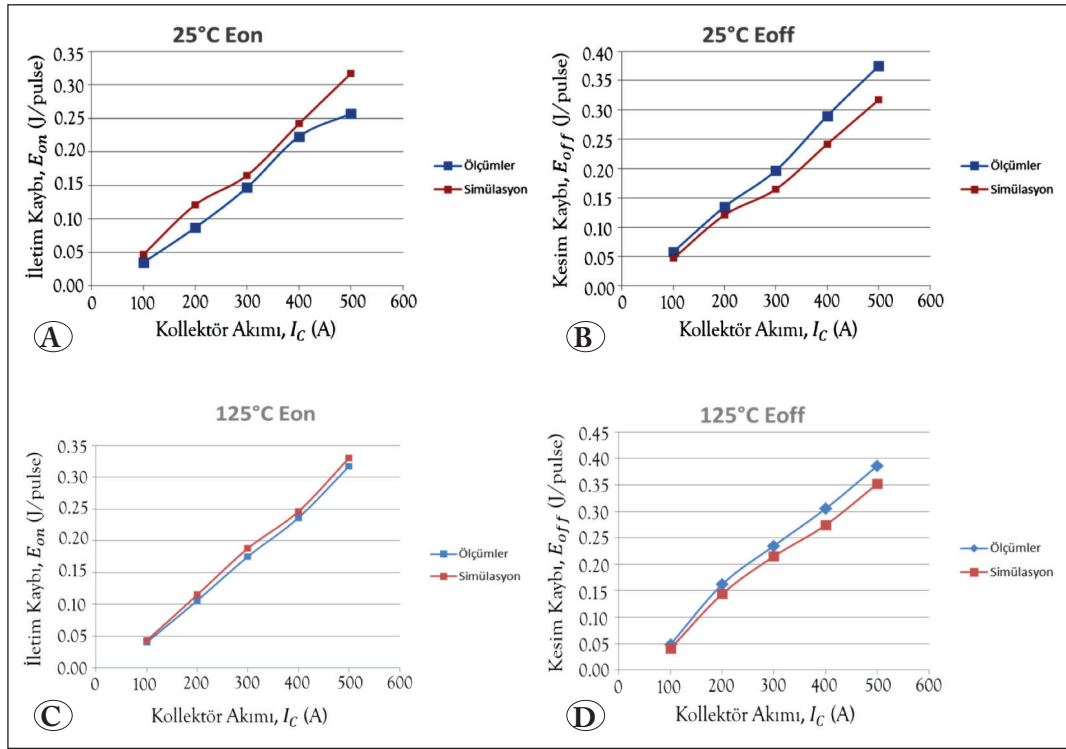
Çizelge 3. IGBT iletme ve kesime geçiş süreleri.

İletme Geçiş Süresi Değer		Kesime Geçiş Süresi	
Benzetim	Deney	Benzetim	Deney
1.58 μ s	1.63 μ s	2.52 μ s	2.4 μ s

Çizelge 4. IGBT kayıpları ölçüm sonuçları.

Çalışma Koşulları			Deneysel		Benzetim		Hata Yüzdesi	
T_j [°C]	i_C [A]	v_{CE} [V]	E_{on} [J/pulse]	E_{off} [J/pulse]	E_{on} [J/pulse]	E_{off} [J/pulse]	E_{on} [%]	E_{off} [%]
125	500	1800	0.317	0.386	0.33	0.352	3.94	9.66
125	400	1800	0.236	0.305	0.246	0.274	4.07	11.31
125	300	1800	0.175	0.235	0.188	0.215	6.91	9.30
125	200	1800	0.106	0.162	0.115	0.144	7.83	12.50
125	100	1800	0.04	0.049	0.043	0.041	6.98	19.51
25	500	1800	0.257	0.375	0.285	0.317	9.82	18.30
25	400	1800	0.223	0.29	0.218	0.242	2.29	19.83
25	300	1800	0.147	0.197	0.133	0.165	10.53	19.39
25	200	1800	0.087	0.135	0.096	0.121	9.38	11.57
25	100	1800	0.035	0.058	0.04	0.047	12.50	23.40

programında dinamik modeli oluşturulmuştur. Bu dinamik modeli oluşturmak için ANSYS Simplorer benzetim programı kullanılmıştır. Dinamik model, IGBT'nin iletme ve kesime geçiş anlarında gerçeğe yakın sonuç verebilecek doğrulukta ve yeterliliktedir. Literatürde IGBT modelleme ile alakalı birçok çalışma mevcuttur (Azar vd 2004, Bryant vd 2008, Duan vd 2018, Haddi vd 1998, Ji vd 2015, Liv d 2018, Ma vd 2020, Meng vd 2017, Nawaz vd 2013, Song vd 2020, Sfakianis vd 2014, Xue vd 2017). Bu çalışmalar, IGBT'nin fiziksel ve matematiksel eşitliklerle oluşturulan modeller olup farklı benzetim ve matematiksel ortamlarda gerçekleştirilmektedir. Bu modeller genel olarak analitik modeller olup yarı iletken fiziğine dayanırlar. Analitik modellemelerde IGBT yarı iletken anahtarın fizik tabanlı matematiksel eşitlikleri farklı yakınsama ve kabullerle farklı uygulamalar için çözümler (Baliga 2011, Clemente vd 1993, Hefner ve Diebolt 1994, Hefner 1995, Saadeh vd 2012). Fakat bu modelleme teknikleri, bu çalışma ile oluşturulan dinamik modele göre daha karmaşık eşitlik ve parametre girdisi gerektirmektedir. Bu çalışmada IGBT modeli oluşturma ANSYS ile daha basit çözüm sunabilmektedir. Çünkü daha üst seviye ve daha pratik bir teknik uygulanmaktadır. IGBT bilgi dokümanı üzerinden girilen R-L-C değerleri ve grafikler sonrası IGBT modülün detay parametrelerinin çıkartılması işini program yapmaktadır. Oluşturulan benzetim modelinin doğruluğunun deneysel çalışma ile karşılaştırması ve bu sayede modelin doğrulanma yöntemi de literatürdeki çoğu IGBT modelleme çalışmalarından farklı ek olarak verilmektedir. Çalışmanın amacı; oluşturulan bu modelin iletme ve kesime geçiş zamanlarında gerçek modül ile dinamik davranışta yakınlığını ölçmektir. Bunun için deneysel



Şekil 9. 25°C ve 125°C'de kolektör akımına göre anahtarlama kayıpları. A) 25°C iletim esnasında B) 25°C kesim esnasında C) 125°C iletim esnasında D) 125°C kesim esnasında.

ortamda ve benzetim ortamında farklı akım kademelerinde IGBT modülü çift darbe test düzeneğinde anahtarlanmış, gerilim-akım tepe değerleri karşılaştırılmıştır. Enerji kayıpları da model ile gerçek modül benzerliği arasındaki bir diğer parametredir. Enerji hesapları IEC 60747-9:2007 standardında verilen sınır değerler baz alınarak hem deneysel ortamda hem de benzetim ortamından alınan veriler ile hesaplanmıştır. Sonuç olarak, IGBT modeli benzetim ortamında gerçeğe yakın referans olacak değerler vermiştir. Bu durum, IGBT modülün nominal çalışma değerlerinde gerçek ortamda anahtarlanmadan önce benzetim ortamında da sistemin güvenli bölgede çalışıldığı konusunda gerçeğe çok yakın bilgi vermesini sağlayacaktır. IGBT üreticilerin 2017 yılında yeni piyasaya çıkarmaya başladıkları yüksek güçlü çift IGBT'li 3300V 450A modül için modelleme yapılmasıyla birlikte, çalışma ayrı bir öneme sahip olmuştur.

5. Kaynaklar

- Azar, R., Udrea F., De Silva, M., Amaratunga, G. ve Dawson, F. 2002.** Advanced SPICE Modelling of Large Power IGBT Modules, *IEEE Trans. Ind. App. Con. 37th*, 40(3), doi: 10.1109/IAS.2002.1042786.
- Baliga, B. J. 2011.** Advanced High Voltage Power Device Concepts. NewYork: Springer-Verlag, Ch. 7, pp. 293–383.
- Bryant, A., Lu, L., Santi, E., Hudgins, J. L. ve Palmer, P. R. 2008.** Modeling of IGBT Resistive and Inductive Turn-On Behavior, *IEEE Trans. Ind. App.* 44(3), 904-914. doi: 10.1109/TIA.2008.921384.
- Choi, U., Blaabjerg, F. ve Lee, K. 2015.** Study and Handling Methods of Power IGBT Module Failures in Power Electronic Converter Systems. *IEEE Trans. on Pow. Elec.* 30(5), 2517-2533. doi: 10.1109/TPEL.2014.2373390
- Clemente, S. M. ve Dapkus, D. A. 1993.** IGBT models account for switching and conduction losses. *Power Conv. Intell. Motion*, 19(8), 51–54.
- Duan, Y., Xiao, F., Luo, Y. ve Iannuzzo, F. 2019.** A Lumped-Charge Approach Based Physical SPICE-Model for High Power Soft-Punch Through IGBT. *IEEE J. Emer. Sel. Top Pow. Elec.* 7(1), 62-70. doi: 10.1109/JESTPE.2018.2874105.
- Haddi, A., Maquad, A., Elmazria, O. ve Hoffmann, A. 1998.** A Simplified Spice Model For IGBT, *Act. Pass. Elec. Comp.*, 21(3), 279–292, doi.org/10.1155/1998/89240.
- Hefner, A. R. Jr. ve Diebolt, D. M. 1994.** An Experimentally Verified IGBT Model Implemented in the Saber Circuit Simulator, *IEEE Trans. Pow. Elec.* 9(5), 532 – 542, doi:10.1109/63.321038.
- Hefner, A. R. Jr. 1995.** Modeling Buffer Layer IGBTs for Circuit Simulation, *IEEE Trans. Pow. Elec.* 10(2), 111 – 123, doi:10.1109/63.372596.

- Ji, S., Lu, T., Zhao, Z., Fujihira, T. ve Igarashi, S. 2015.** Physical Model with Parameter Extraction Method for Fuji Electric 1.7kV IGBT. *18th Int. Conf. Elec. Mach. Syst. (ICEMS)*. doi: 10.1109/ICEMS.2015.7385103.
- Ji, S., Lu, T., Zhao, Z., Yuan, L. 2012.** Modelling of high voltage IGBT with easy parameter extraction. *7th Int. Pow. Elec. and Motion Cont. Conf.* doi: 10.1109/IPEMC.2012.6258985.
- Kawase, D., Inaba, M., Horiuchi, K. ve Saito, K. 2015.** High voltage module with low internal inductance for next chip generation - next High Power Density Dual (nHPD2). *Int. Exh. and Conf. for Pow. Elec. Intel. Motion, Rene. Ener. and Ener. Man., PCIM Europe*.
- Li, X., Luo, Y., Duan, Y., Liu, B., Huang, Y. Ve Sun, F. 2018.** Stray Inductance Extraction of High-Power IGBT Dynamic Test Platform and Verification of Physical Model. *IEEE Int. Pow. Elec. App. Conf. Exp. (PEAC)*. doi: 10.1109/PEAC.2018.8590475.
- Ma, T., Jia, Y. ve Luo, Y. 2020.** Physical Model of FS-IGBT Considering Dynamic Avalanche Electrical Characteristics and Analysis of Chip Non-uniform Stress, *IEEE Int. Conf. Inf. Tech. Big Data Artif. Intel. (ICIBA)*, doi: 10.1109/ICIBA50161.2020.9277207.
- Meng, J., Ning, P., Wen, X. ve Li, L. 2017.** A finite difference method modeling for IGBT and diode in PSPICE. *Chinese J. Elec. Eng.* 3(3), 85-93. doi: 10.23919/CJEE.2017.8250428.
- Musikka, T., Popova, L., Juntunen, R., Lohtander, M., Silventoinen, P., Pyrhönen, O., Pyrhönen, J. ve Maula, K. 2013.** Improvement of IGBT Model Characterization with Experimental Tests, *15th Euro. Conf. Pow. Elec. App. (EPE)*. doi: 10.1109/EPE.2013.6631841.
- Nawaz, M., Chimento, F., Mora, N. ve Zammoni, M. 2013.** Simple Spice Based Modeling Platform for 4.5 kV Power IGBT Modules, *IEEE En. Conv. Cong. Exp.* doi:10.1109/ECCE.2013.6646712.
- Nicolai, U. 2014.** AN 1403: Determining switching losses of SEMIKRON IGBT modules, Revision 00, Semikron.
- Oustad, D., Lefebre, S., Petit, M., Lhotellier, D. ve Ameziane, M. 2016.** Comparison of modeling switching losses of an IGBT based on the datasheet and an experimentation, *18th Euro. Conf. Pow. Elec. App. (EPE'16 ECCE Europe)*. doi: 10.1109/EPE.2016.7695494.
- Saadeh, M., Mantooth, H. A., Balda, J. C., Hudgins, J.L., Santi, E., Ryu, S. Ve Agarwall, A. 2012.** A unified silicon/silicon carbide IGBT model. *27. Ann. IEEE Appl. Pow. Elec. Conf. and Exp. (APEC)*, doi: 10.1109/APEC.2012.6166055.
- Sfakianis, G., Nawaz, M. ve Chimento, F. 2014.** A Temperature Dependent Simple Spice Based Modeling Platform for Power IGBT Modules, *En. Conv. Cong. Exp. (ECCE), IEEE*. doi: 10.1109/ECCE.2014.6953788.
- Sheng, K., Williams, B. W. ve Finney, S. J. 2000.** A Review of IGBT Models, *IEEE Trans. Pow. Elec.*, 15(6), 1250 – 1266, doi: 10.1109/63.892840.
- Song, P., Zang, L., Zou, L., Zhao, T. ve Sun, Y. 2020.** An Improved Transient Model of High Voltage IGBT Based on Vector Fitting. *IEEE Int. Conf. High Vol. Eng. App. (ICHVE)*, doi: 10.1109/ICHVE49031.2020.9279756.
- Volke, A. ve Hornkamp, M. 2015.** Infineon, Second Edition, IGBT Modules, Technologies, Driver and Application, 534 pp.
- Xue, P., Fu, G. Ve Zhang, D. 2017.** Modeling Inductive Switching Characteristics of High-Speed Buffer Layer IGBT. *IEEE Trans. Pow. Elec.*, 32(4), 3075 – 3087. doi: 10.1109/TPEL.2016.2570838.
- CWT Technical Notes. 2011.** Power Electronic Measurements Ltd. <https://gmw.com/wp-content/uploads/2019/06/CWT-Technical-notes-HF-and-Rise-time-01A.pdf>.
- IEC 60747-9. 2007** Semiconductor devices - Discrete devices - Part 9: Insulated-gate bipolar transistors (IGBTs).
- MBM450FS33F IGBT Module datasheet. 2017.** Hitachi Semiconductor, https://www.hitachi-power-semiconductor-device.co.jp/products/igbt/pdf/IGBT-SP-14035R5_MBM450FS33F_web.pdf.
- Application Note. 2015.** Measuring Method of Stray Inductance for Inverter Circuit. Hitachi Semiconductor, https://www.hitachi-power-semiconductor-device.co.jp/en/products/igbt/pdf/stray_inductance.pdf.