

# IGBT ELEMANNININ PİN DİYOT EŞDEĞER DEVRE MODELİ YARDIMI İLE DC AKIM-GERİLİM KARAKTERİSTİĞİNİN ELDE EDİLMESİ

M. Serhat KESERLİOĞLU<sup>1</sup> H. Hüseyin ERKAYA<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü  
Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi  
Osmangazi Üniversitesi, 26480, Meşelik, Eskişehir

<sup>1</sup>e-posta: mskeser@ogu.edu.tr

<sup>2</sup>e-posta: hherkaya@ogu.edu.tr

*Anahtar sözcükler: Yarıiletken elemanlar, Simülasyon, Güç elektroniği.*

## ABSTRACT

*A hybrid model was developed for the current-voltage characteristics of an IGBT power switch. The model is based on a MOSFET + PiN diode combination. The PiN diode structure was simulated with the two-dimensional finite differences model while an analytical model for the MOSFET was used. The DC characteristic of the IGBT was obtained with this model.*

## 1. GİRİŞ

Güç elektroniği elemanlarının modellenmesi ve benzeşimi dönüştürücü tasarım ve analizinde önemli bir rol oynar. IGBT tabanlı eviriciler motor kontrolü gibi indüktif yüklü devrelerde yaygın olarak kullanılırlar. Ana anahtar elemanın karakteristikleri eviricinin kabiliyet ve verimliliğini önemli ölçüde etkiler. Bu sebeplerden dolayı gerçek bir evirici yapmadan önce uygun bir eleman modelini oluşturmak ve evirici performansının benzeşimini yapmak çok önemlidir [1].

IGBT ilk olarak 1982'de Baliga tarafından duyurulmuş ve o tarihten bu yana modellenmesi üzerine çok sayıda makale yayınlanmıştır [2]. Bu makalelerde, IGBT'nin modellenmesine yönelik farklı amaçlara, farklı bakış açılarına ve farklı performanslara sahip farklı yöntemler kullanılmıştır. Kullanılan modelleme yöntemleri dört farklı sınıfta ele alınabilir. Bunlar, analitik modeller, yarı matematiksel modeller, davranışsal modeller ve yarı sayısal modellerdir [3].

IGBT'nin davranışı, geniş sürüklenme bölgesinde bulunan taşıyıcıların davranışına oldukça bağlıdır.

Yüksek seviye akıtma koşulları altında bu bölgede bulunan çoğunlukta taşıyıcıların dinamik davranışı "Ambipolar Difüzyon Denklemi" vasıtasıyla tanımlanır.

$$D \frac{\partial^2 p(x,t)}{\partial x^2} = \frac{p(x,t)}{\tau} + \frac{\partial p(x,t)}{\partial t} \quad (1)$$

Burada  $D$  ambipolar difüzyon katsayısı,  $\tau$  sürüklenme bölgesi içindeki yüksek-seviye taşıyıcı yaşam süresi ve  $p(x,t)$  artık taşıyıcı yoğunluğudur. Bundan dolayı çoğu matematiksel IGBT modelleme yaklaşımı sürüklenme bölgesinin benzeşimine odaklanır ve bu da ambipolar difüzyon denkleminin çözümüne götürür.

## 2. IGBT YAPISI VE ÇALIŞMASI

Genel bir n-kanallı NPT-IGBT'nin (Non-Punch-Through IGBT) dikey kesiti Şekil.1.a'da gösteriliyor. Elemanın her bir tabakasındaki katkılama tipini değiştirmek yoluyla p-kanallı IGBT'ler de yapmak mümkündür. Ayrıca  $p^+$  akaç kontağı ve  $n^-$  sürüklenme tabakası arasında ilave bir  $n^+$  tampon tabaka bulunduran IGBT'ler PT-IGBT (punch-through IGBT) olarak adlandırılır [4].

Geçit-kaynak gerilimi eşik gerilimi değerini aştığında IGBT'nin geçidin altında kalan kısmında bir evirilme tabakası oluşur. Bu evirilme tabakası, tam olarak MOSFET'de olduğu gibi  $n^-$  sürüklenme bölgesini  $n^+$  kaynak bölgesine bağlar. Bu evirilme tabakası içinden bir elektron akımı akar ve buna karşılık olarak  $p^+$  akaç tabakasından  $n^-$  sürüklenme bölgesinin içine delik akıtmasının başlamasına yol açar. Enjekte olan bu delikler hem sürüklenme hem de difüzyon vasıtasıyla

hareket ederek sürüklenme-bölgesini aşarlar ve farklı yollar kat ederek  $n^+$  kaynak bölgesini çevreleyen p-tipi gövde bölgesine ulaşırlar. Delikler p-tipi gövde bölgesine varır varmaz, bu deliklerin oluşturduğu fakirleşme bölgesi yükü (space charge) gövde bölgesinin kontağı olan kaynak metalinden elektronları çeker ve ilave delikler elektronlarla yeniden birleşirler.

### 3. BENZEŞİM PROGRAMI

Yarıiletken elemanların modellenmesinde ve benzeşiminde kullanılan denklemler, sırasıyla, elektron ve delikler için akım yoğunluğu denklemleri;

$$\vec{J}_n = e\mu_n n\vec{E} + eD_n \nabla n \quad (2)$$

$$\vec{J}_p = e\mu_p p\vec{E} - eD_p \nabla p \quad (3)$$

süreklilik denklemleri;

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{e} \text{div} \vec{J}_n + U_n \quad (4)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{e} \text{div} \vec{J}_p + U_p \quad (5)$$

ve Poisson denklemi

$$\nabla^2 V = -\frac{e}{\epsilon} (p - n + N_D^+ - N_A^-) \quad (6)$$

olarak verilir [5,6].  $U_n$  ve  $U_p$  terimleri  $g$  ve  $R$  üreme ve yeniden birleşme hızları olmak üzere, (7) ve (8) denklemleriyle ifade edilir.

$$U_n = g_n - R_n \quad (7)$$

$$U_p = g_p - R_p \quad (8)$$

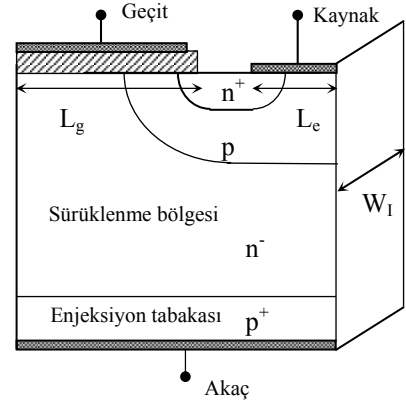
Shockley-Read-Hall anlamında yeniden birleşmeyi temsil eden  $R_n$  ve  $R_p$  terimleri birbirine eşit alındı.

$$R_n = R_p = \frac{np - n_i^2}{T_n(p + n_i) + T_p(n + n_i)} \quad (9)$$

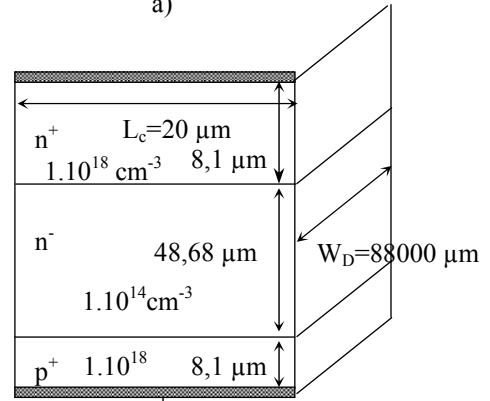
Kolaylık olması için  $N_D^+ = N_D$  ve  $N_A^- = N_A$  olarak alınmıştır, yani tüm katkı atomlarının iyonlaştığı kabul edilmiştir.

Geliştirilen 2-boyutlu benzeşim programı ile IGBT'nin "MOS + PiN diyot" eşdeğer devresinde yer

alan PiN diyotun benzeşimi yapılarak akım-gerilim karakteristiği elde edilmiştir. Bu amaçla kullanılan PiN diyot geometrisi Şekil.1.b'de gösterilmektedir. Elde edilen akım-gerilim karakteristiği ise Şekil.2'de verildiği gibidir.



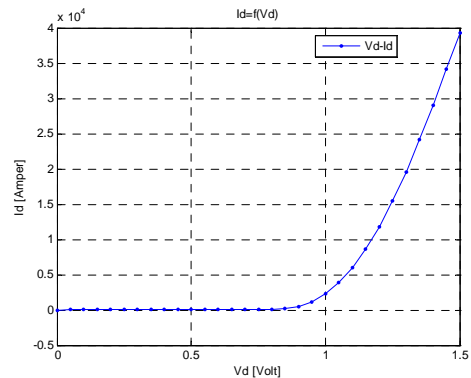
a)



Anot

b)

Şekil.1 a) IGBT geometrik yapısı, b) Taban bölgesini içeren eşdeğer PiN yapısı



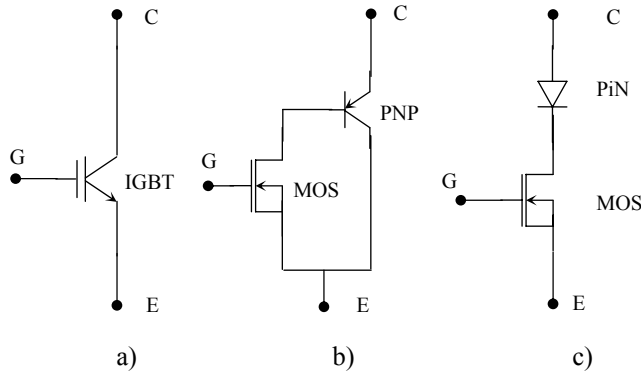
Şekil.2 PiN diyot akım-gerilim karakteristiği

#### 4. ÖNERİLEN YÖNTEM

Elektriksel davranışı esas olarak belirleyen düşük katkılı bölge, PiN diyot, IGBT veya bipolar güç transistörleri gibi bütün güç elemanlarının yaygın bir ortak özelliğidir. Düşük katkılı bölgenin doğru bir tanımını elde etmek için bu bölgedeki yük taşıyıcısı dağılımı gereklidir. Goebel ve Metzner tarafından uygulanan yöntemlerin ana fikri, sadece düşük katkılı bölgede yarıiletken denklemlerini çözen hızlı bir sayısal algoritma kullanmaktır [7,8]. Diğer bölgelerde analitik denklemler uygulanır. Bu yaklaşımlar N- taban bölgesi içinde meydana gelen olayların iyi bir tanımını verse bile elemanın diğer bölgelerinde örneğin fakirleşme bölgesi içinde ne olduğunun tanımlanmasında zayıf kalır.

Goebel ve Metzner tarafından uygulanan ve “Karma-Yöntem” olarak adlandırılan yönteme alternatif olarak bir yöntem önerildi. Yöntemin farklılığı, güç elemanının düşük katkılanmış taban bölgesindeki taşıyıcı yoğunluğunun elde edilmesiyle ilgilidir. Bunu yapmak için IGBT’ye karşı eşdeğer devrelerden de yararlandı. Ambipolar difüzyon denkleminin sadece bu düşük katkılı taban bölgesinde ve bazı basitleştirici koşullar altında çözülmesi yerine eşdeğer devrede IGBT’nin düşük katkılı taban bölgesini içeren eşdeğer devre elemanının tam simülasyonu yapıldı.

Şekil.3’de IGBT’nin iki temel eşdeğer devre modeli gösteriliyor. Bunlardan “MOS + PNP” modelinde PNP transistör ve “MOS + PiN” modelinde de PiN diyot IGBT’nin düşük katkılı taban bölgesini içermektedir.



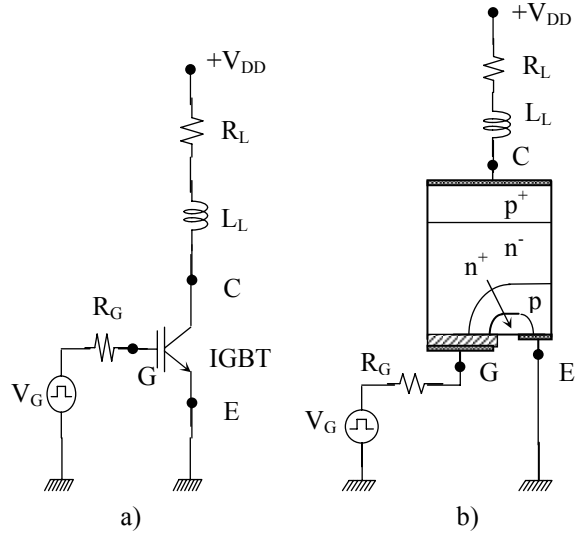
Şekil.3 a) IGBT devre sembolü, b) MOS + PNP transistör modeli, c) MOS + PiN diyot modeli.

IGBT’nin PiN diyotlu eşdeğer devresindeki PiN diyot geometrisini oluşturmak için Pendharkar ve Shenai’nin çalışmasından yararlandı [9]. Bu çalışmada ZVS (Zero Voltage Switching) koşulu altındaki bir IGBT’nin ve bir PiN diyotun iletme-geçme dinamikleri incelenmiştir. Her iki elemandan

elde edilen sonuçların sağlıklı bir biçimde karşılaştırılabilmesi için elemanlara ilişkin yapısal ve elektriksel özelliklerin benzer olması gerekir. Pendharkar ve Shenai tarafından izlenen yol şöyledir [9]:

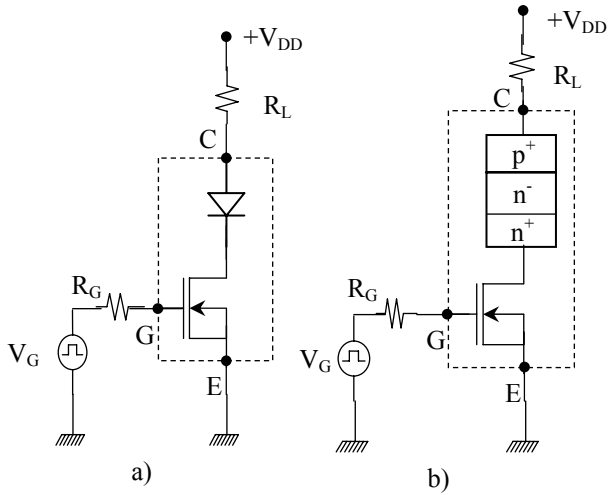
1. IGBT elemanında ortaya çıkan ve PiN etkisi olarak adlandırılan etki geçit bölgesinde olduğu için geçit uzunluğu (Şekil.1.a’ da  $L_g$ ) anot uzunluğuna (Şekil.1.b’ de  $L_c$ ) eşit yapılır.
2. Amatör uzunluğu (Şekil.1.a’ da  $L_e$ ) geçit uzunluğu  $L_g$ ’ye eşit alınır.
3. Sürüklenme bölgesinde aynı akım yoğunluğunun elde edilmesi için IGBT’nin genişliği  $W_I$  PiN diyotun genişliği  $W_D$ ’nin yarısı seçilir.
4. Son olarak IGBT sürüklenme bölgesi parametreleri PiN diyotunkilere tam olarak eşit seçilir.

Şekil.1.b’de gösterilen geometrik yapı vasıtasıyla IGBT’nin “MOS + PiN diyot” modeli oluşturulabilir. Bu model, IGBT’ye ait doğru akım-gerilim karakteristiklerini ve geçici-hal davranışını belirlemek için, daha önceki bazı çalışmalarda kullanılan ve Şekil.4.a’da gösterilen test devresi ile birlikte çalıştırıldı [10–11].

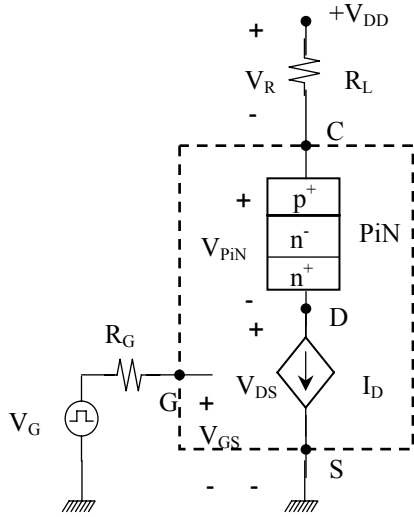


Şekil.4 a) IGBT test devresi, b) IGBT yerine benzeşim eşdeğeri konulan devre.

DC analiz için, Şekil.4’de verilen devrelerde  $L=0$  alındı. IGBT yerine “MOS+PiN diyot” eşdeğeri ve PiN diyot yerinde benzeşim eşdeğerinin konulmasıyla Şekil.5’de verilen devreler elde edilir.



Şekil.5 a) “MOS+PiN” eşdeğerli test devresi, b) PiN yerine benzeşim eşdeğeri konulan devre.



Şekil.6 MOS yerine büyük işaret eşdeğeri konulan devre.

MOS yerine büyük işaret eşdeğer devre modeli konularak Şekil.6’ de verilen devre elde edilir. Buradan devre denklemleri,

$$V_{DD} - V_R - V_{PiN} - V_{DS} = 0 \quad (10)$$

olarak yazılır. Denklemden yer alan  $V_R$  ve  $V_{PiN}$  gerilimleri  $I_D$  akımına bağlı olarak yazılabilir. Bu durumda (10) denklemi aşağıdaki gibi olur:

$$V_{DD} - I_D \cdot R_L - g(I_D) - V_{DS} = 0 \quad (11)$$

Burada  $g(I_D)$  terimi PiN diyot üzerinde düşen gerilimin akıma bağlı ifadesidir ve diyot akım-gerilim

karakteristiğinden elde edilir. MOSFET elemanın triode modunda çalıştığı kabul edilerek  $I_D$  akımı  $V_{DS}$  gerilimine bağlı olarak yazılabilir:

$$I_D = K \cdot [2 \cdot (V_{GS} - V_{th}) \cdot V_{DS} - V_{DS}^2] \quad (12)$$

$I_D = G(V_{DS})$  dersek (11) denklemi,

$$V_{DD} - R_L \cdot G(V_{DS}) - g[G(V_{DS})] - V_{DS} = 0 \quad (13)$$

biçimine dönüşür, ya da

$$F(V_{DS}) = V_{DD} - R_L \cdot G(V_{DS}) - g[G(V_{DS})] - V_{DS} = 0 \quad (14)$$

olur. Bu denkleminin çözümü, uygulanan bir  $V_{DD}$  besleme gerilimi için eşdeğer IGBT modelinin MOSFET parçası üzerinde oluşan  $V_{DS}$  gerilimini verir, buradan da (12) denklemi yardımıyla  $I_D$  akımı hesaplanabilir. IGBT anot gerilimi ise,

$$V_A = V_{DD} - R_L \cdot I_D \quad (15)$$

yardımıyla bulunur. Denklem (14)’ ü çözmek için Newton-Raphson yöntemi uygulandı. Buna göre,

$$V_{DS_{k+1}} = V_{DS_k} - \frac{F(V_{DS_k})}{F'(V_{DS_k})}, \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (16)$$

denklemi kullanılarak  $V_{DS}$  gerilim değeri belirlenebilir. Burada (14) denklemi yardımıyla,

$$F'(V_{DS}) = \frac{\partial F(V_{DS})}{\partial V_{DS}} = \frac{\partial G(V_{DS})}{\partial V_{DS}} \left[ -R_L - \frac{\partial g}{\partial G(V_{DS})} \right] - 1 \quad (17)$$

ifadesi elde edilebilir. Ayrıca (12) denklemi yardımıyla elde edilen,

$$\frac{\partial G(V_{DS})}{\partial V_{DS}} = 2 \cdot K \cdot [V_{GS} - V_{th} - V_{DS}] \quad (18)$$

türev ifadesinin denklem (17)’ de yerine yazılmasıyla,

$$\frac{\partial F(V_{DS})}{\partial V_{DS}} = -2 \cdot K \cdot [V_{GS} - V_{th} - V_{DS}] \cdot \left[ R_L + \frac{\partial g[G(V_{DS})]}{\partial G(V_{DS})} \right] - 1 \quad (19)$$

denkleminde ulaşılır. Denklem (19) ve (14) ifadesi denklem (16)’ de yerlerine yazılarak  $V_{DS}$  gerilimini belirlemek için iteratif bir bağlantı elde edilebilir.

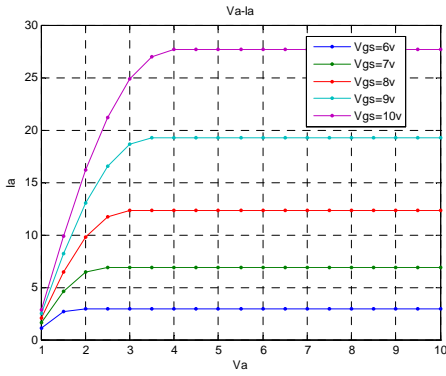
$$V_{DS_{k+1}} = V_{DS_k} + \frac{V_{DD} - R_L \cdot G(V_{DS_k}) - g[G(V_{DS_k})] - V_{DS_k}}{2 \cdot K \cdot [V_{GS} - V_{th} - V_{DS_k}] \left[ R_L + \frac{\partial g[G(V_{DS_k})]}{\partial G(V_{DS_k})} \right]} + 1$$

$$k = 1, 2, 3, \dots \quad (20)$$

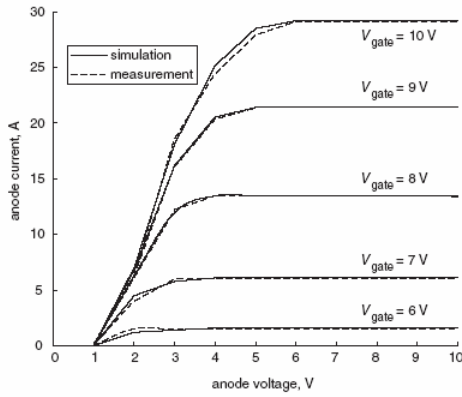
Eşdeğer modeldeki MOSFET' e ait parametreler,

$$K = 3.0752 \text{ A/V}^2 \quad \text{ve} \quad V_{th} = 4 \text{ Volt}$$

olarak alındı. Buradan, farklı  $V_{GS}$  geçit gerilimi değerleri için ve  $R_L=30\Omega$  kullanılarak IGBT elemanına ilişkin doğru akım-gerilim karakteristikleri Şekil.7' da gösterildiği gibi elde edildi.



Şekil.7 IGBT elemanına ilişkin doğru akım-gerilim karakteristikleri.



Şekil.8 IGBT elemanına ilişkin doğru akım-gerilim karakteristikleri, [10].

## 5. SONUÇ

Bu çalışmada “MOS + PiN diyot” eşdeğer devre modeli kullanılarak IGBT elemanına ait doğru akım-gerilim karakteristikleri elde edildi. Eşdeğer devrede yer alan ve IGBT'nin düşük katkılı taban bölgesini içeren PiN diyot elemanına ait akım-gerilim

karakteristiğinin elde edilebilmesi için 2-boyutlu bir benzeşim programı geliştirildi. Yarıiletken iletim denklemleri IGBT elemanının sadece düşük katkılı taban bölgesinde çözülmek yerine, eşdeğer devrede IGBT'nin taban bölgesini içeren elemanın tam benzeşimi ve MOS yapısını tanımlayan analitik ifadeler kullanılarak sonuca gidildi. Bu çalışmada kullanılan IGBT yapısına benzer bir yapı için elde edilen akım-gerilim karakteristikleri Şekil.8' de gösteriliyor [10]. Şekil.7 ve Şekil.8' de verilen sonuçlar birbirine oldukça yakındır.

## KAYNAKLAR

- [1] Haitao Z., Zhengming Z., Modeling and simulating for IGBT based on PSIM, POWER ELECTRONICS and MOTION CONTROL CNF. IPENC, Vol.2, 843-846, 2004.
- [2] Baliga B. J., Adler M.S., Gray V.P., Love R.P., Zommer N., The insulated gate rectifier, in INT. ELECTRON DEVICES MEETING, Abstr. 10-6, 264-267, 1982.
- [3] Sheng K., Finney S.J., Williams B.W., Thermal stability of IGBT high-frequency operation, IEEE TRANS. ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, v. 47, no 1, 2000.
- [4] Mohan N., Undeland T.M., Robbins W.P., Power Electronics: Converters, Applications and Design, John Wiley&Sons, 667 p., 1989.
- [5] Slotboom J. W., Computer-Aided Two-Dimensional Analysis of Bipolar Transistor, IEEE TRAN. ON ELECTRON DEVICES, Vol. ED-20, no. 8, pp. 669-679, 1973.
- [6] Selberherr S., Schütz A., Pötzl H. W., MINIMOS- A Two-Dimensional MOS Transistor Analyzer, IEEE J. OF SOLID STATE CIRCUITS, Vol SC-15, NO.4, pp. 605-615, 1980.
- [7] Goebel H., Unified method for modeling semiconductor power devices, IEEE TRANS. POWER ELECTRON, vol. 9, 497-505, 1994.
- [8] Metzner D., Vogler T., Schroeder D., Modular concept for the circuit simulation of bipolar power semiconductors, IEEE TRANS. POWER ELECTRON, vol. 9, 506-513, 1994.
- [9] Pendharkar P., Stenia K., A critique of the turn-on physics of power bipolar devices, BIPOLAR/BICMOS CIRCUITS and TECHNOLOGY MEETING, 209-217, 1995.
- [10] Kao C.H., Tseng C.C., Liang, Y.C., Equivalent circuit model for an insulated gate bipolar transistor, IEE PROC.-ELECTR. POWER APPL., vol. 152, no. 6, 2005.
- [11] Hefner A. R., Diebolt D. M., Behavioral Modeling of the IGBT Using the Hammerstein Configuration, IEEE TRAN. ON POWER ELECTRONICS, Vol. 9, NO. 5, 532-542, 1994.