

รายการอ้างอิง

- [1] สำรวัย สังข์สะอาด, วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์, 2547.
- [2] IEC 61000-4-12, Electromagnetic Compatibility (EMC), Part 4: Testing and Measurement Techniques, Section 12: Oscillatory Waves Immunity Test, 2001.
- [3] IEC 61000-4-18, Electromagnetic Compatibility (EMC), Part 4: Testing and Measurement Techniques, Section 18: Damped Oscillatory Wave Immunity Test, 2006.
- [4] Bek, S., "Circuits for oscillatory waves immunity test," Proceedings of the 7th International Conf. The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics", (February 2003): 349-350.
- [5] กมล กำรเจริญ, การออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดอิมพัลส์คลื่นผสม 6 กิโลโวลต์ 3 กิโลแอมแปร์, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.
- [6] N. Mohan, T.M. Undeland, and W.P. Pobbons, Power Electronics Converters Applications and Design, Second edition, John Wiley & Sons: Singapore, Inc, 1995.
- [7] J.F. Chen, J.N. Lin and T.H. Ai, "The techniques of the serial and paralleled IGBTs," Proceedings of the 22nd IEEE IECON International Conf. On Industrial Electronics, Control, and Instrumentation, (August 1996): 999-1004.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ผลตอบสนองความถี่ของตัวกรองอนาล็อกในโปรแกรม MATLAB

ก.1 ฟังก์ชันถ่ายโอน

การประมวลผลสัญญาณสามารถทำการแปลงลาปลาซเพื่อวิเคราะห์ในโดเมนความถี่จากฟังก์ชันถ่ายโอนในรูปแบบดังนี้

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_0 + b_1s^{-1} + b_2s^{-2} + \dots + b_ns^{-n}}{a_0 + a_1s^{-1} + a_2s^{-2} + \dots + a_ns^{-n}} \quad (\text{ก.1})$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนแสดงอยู่ในรูปแบบเศษส่วนของพหุนาม การป้อนแบบจำลองของระบบจะป้อนค่าสัมประสิทธิ์ของพหุนามตัวเศษและพหุนามตัวส่วนไว้ในรูปแบบเวกเตอร์แถว เรียงจากอันดับสูงสุดไล่ลงมาจนถึงอันดับศูนย์ หากสัมประสิทธิ์อันดับใดเป็นศูนย์ก็ต้องใส่เลขศูนย์สำหรับอันดับนั้นด้วย

พิจารณาฟังก์ชันถ่ายโอนต่อไปนี้

$$H(s) = \frac{10s + 10}{s^3 + 5s^2 + 6s} \quad (\text{ก.2})$$

สามารถป้อนข้อมูลของฟังก์ชันถ่ายโอนได้ดังนี้

```
num = [10 10]; % ป้อนพหุนามตัวเศษ
```

```
den = [1 5 6 0]; % ป้อนพหุนามตัวส่วน
```

```
printsys (num,den) % คำสั่งให้แสดงฟังก์ชันถ่ายโอน
```

```
num/den =
```

$$\frac{10s + 10}{s^3 + 5s^2 + 6s} \quad \% \text{ ผลลัพธ์ที่ได้}$$

ก.2 แผนภาพโบเด

การใช้โปรแกรม MATLAB ในการหาผลตอบสนองความถี่ของตัวกรองอนาล็อกนี้จะได้ผลตอบสนอง คือ ผลตอบสนองแอมพลิจูด (Amplitude Response) และผลตอบสนองเฟส (Phase Response) ซึ่งโปรแกรม MATLAB จะมีฟังก์ชันที่ใช้สำหรับการหาผลตอบสนองความถี่ของระบบอนาล็อก คือ ฟังก์ชัน bode ซึ่งจะมีรูปแบบการใช้งานดังนี้

bode (num, den, w)

หรือ bode (A, B, C, D, w)

ขึ้นอยู่กับว่าแบบจำลองของระบบถูกเก็บอยู่ในรูปแบบใด โดยที่ w เป็นช่วงความถี่ที่จะแสดงผล กำหนดได้โดยการใช้ฟังก์ชัน logspace ซึ่งจะมีรูปแบบการใช้งานดังนี้

w = logspace (d1, d2)

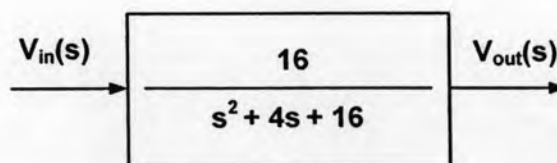
ช่วงความถี่ w จะมีค่าเริ่มตั้งแต่ $10^{d1} \rightarrow 10^{d2}$ ตัวอย่างเช่น

w = logspace (-1, 2)

จะได้ w เป็นช่วงความถี่ตั้งแต่ 0.1 rad/s \rightarrow 100 rad/s สำหรับในกรณีที่ไม่ได้กำหนด w ไว้ในฟังก์ชัน bode โปรแกรม MATLAB ก็จะใช้เลือกช่วงความถี่ที่เหมาะสมสำหรับการแสดงผลดังกล่าว

พิจารณาฟังก์ชันถ่ายโอนต่อไปนี้

$$H(s) = \frac{16}{s^2 + 4s + 16} \quad (\text{ก.3})$$



รูปที่ ก.1 ภาพบล็อกของฟังก์ชันถ่ายโอน

แสดงแผนภาพโบเดได้โดยป้อนข้อมูลของฟังก์ชันถ่ายโอนดังนี้

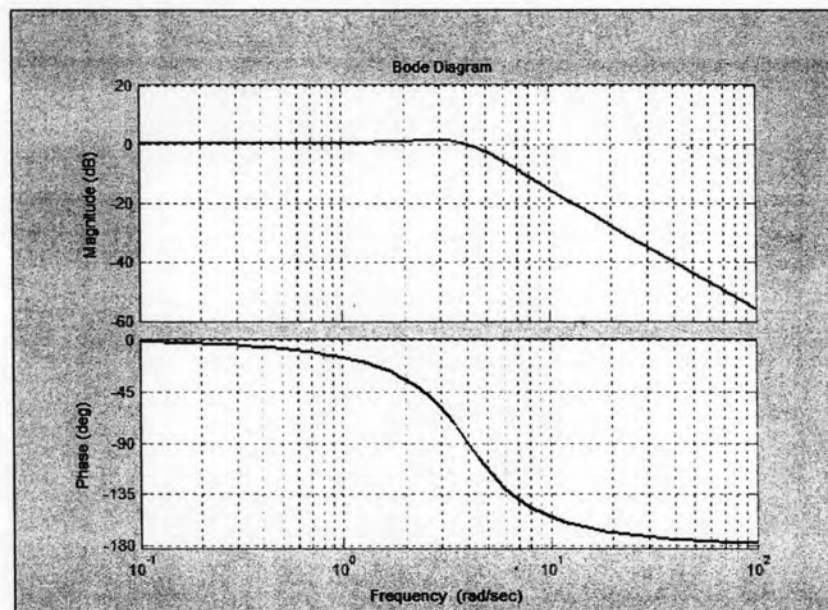
```
num = [16];
```

```
den = [1 4 16];
```

```
w = logspace(-1, 2);
```

```
bode (num, den, w)
```

จะได้แผนภาพโบเดซึ่งแสดงในช่วงความถี่ตั้งแต่ 0.1 rad/s → 100 rad/s ดังแสดงในรูปที่ ก.2



รูปที่ ก.2 แผนภาพโบเดจากโปรแกรม MATLAB

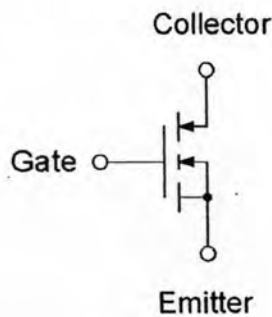
ภาคผนวก ข

ไอจีบีที (Insulated Gate Bipolar Transistors: IGBT)

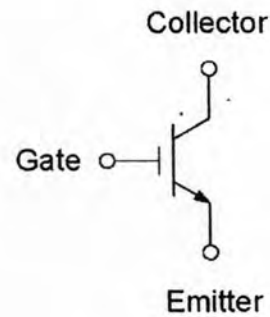
ไอจีบีทีเป็นอุปกรณ์ที่รวมคุณลักษณะที่ดีของทรานซิสเตอร์กำลัง (บีเจที) และ มอสเฟตกำลังเข้าด้วยกัน คือ จะมีกำลังสูญเสียขณะนำกระแสต่ำเหมือนบีเจที แต่ไม่มีปัญหาการ ทลายแบบที่สอง เกิดมีอิมพีแดนซ์สูง ต้องการพลังงานในการขับนำน้อยและสามารถเปลี่ยน สถานะได้เร็วเหมือนมอสเฟตกำลัง

ข.1 สัญลักษณ์และโครงสร้างไอจีบีที

จากการที่ไอจีบีทีได้รวมคุณสมบัติของบีเจทีและมอสเฟตกำลัง ทำให้มีการกำหนด สัญลักษณ์ของไอจีบีทีได้เป็น 2 สัญลักษณ์ ดังรูปที่ ข.1 เพราะคุณสมบัติทางด้านอินพุตที่ควบคุม การนำกระแสด้วยแรงดันเหมือนกับมอสเฟตกำลัง และคุณสมบัติทางด้านเอาต์พุตเหมือนกับบีเจที



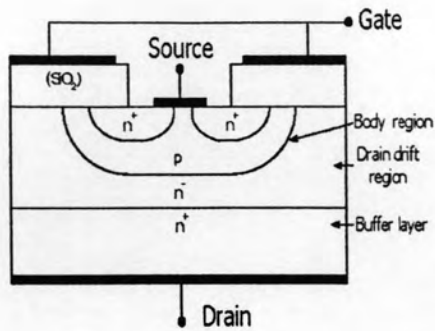
(ก) สัญลักษณ์ที่คล้ายมอสเฟตกำลัง



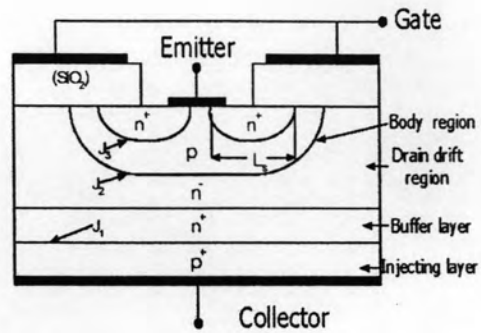
(ข) สัญลักษณ์ที่คล้ายบีเจที

รูปที่ ข.1 สัญลักษณ์ของไอจีบีที

จากรูปที่ ข.2 โครงสร้างของไอจีบีทีโดยส่วนใหญ่จะมีลักษณะคล้ายกับมอสเฟตกำลังมาก จะแตกต่างกันตรงที่ไอจีบีทีมีช่องแคบ n จะมีชั้น p^+ หรือชั้นฉีดพาหะ (Injecting Layer) เพิ่มขึ้นอีก หนึ่งต่ออยู่ระหว่างขาเดรน จากการที่ขาเกตถูกกันด้วยชั้นของซิลิกอนออกไซด์เป็นผลทำให้ความ ด้านทานด้านเข้าที่ขาเกตมีค่าสูงมากเหมือนกับมอสเฟตกำลัง



(ก) มอสเฟตกำลัง

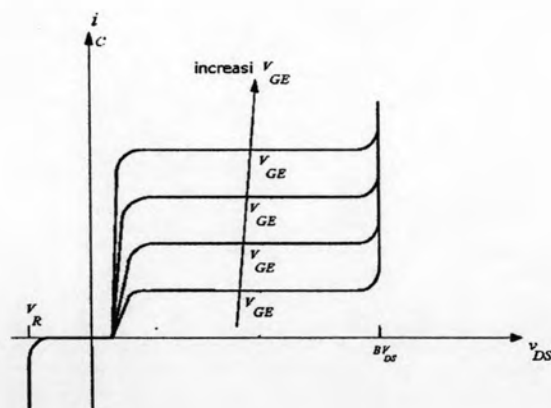


(ก) ไอจีบีที

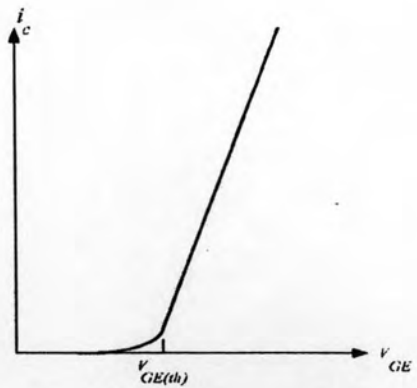
รูปที่ ข.2 ภาพตัดขวางแนวตั้งของมอสเฟตกำลังและไอจีบีที

ข.2 คุณสมบัติของกระแสและแรงดันของไอจีบีที

กราฟคุณลักษณะของไอจีบีทีที่แสดงในรูปที่ ข.3 (ก) มีลักษณะคล้ายกับกราฟคุณสมบัติของบีเจที แต่ต่างกันตรงพารามิเตอร์ควบคุมจะเป็นแรงดันระหว่างขาเกตและขาอีมีเตอร์เป็นตัวควบคุมการนำกระแส ไม่ใช่กระแสเบสเหมือนบีเจที



(ก) คุณสมบัติระหว่างกระแสและแรงดัน

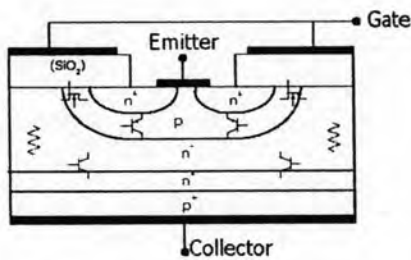


(ข) คุณลักษณะการถ่ายโอน

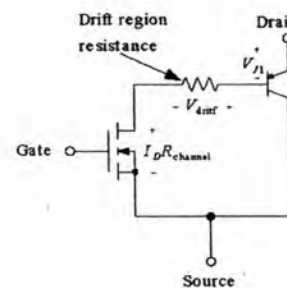
รูปที่ ข.3 คุณลักษณะกระแสและแรงดันของไอจีบีที

จากรูปที่ ข.3 (ข) แสดงคุณสมบัติการถ่ายโอนของไอจีบีทีที่เหมือนกับลักษณะของ มอสเฟตกำลัง ซึ่งลักษณะดังกล่าวจะมีลักษณะเป็นเส้นตรงแต่จะเริ่มไม่เป็นเส้นตรงโดยจะโค้งขึ้น เมื่อกระแสคอลเล็กเตอร์มีค่าต่ำ นั่นคือจุดที่แรงดันระหว่างขาเกต และขาอีมีเตอร์ต่ำลงเข้าใกล้ แรงดันจุดเริ่มเปลี่ยนสภาวะการทำงาน (Threshold voltage; $V_{GE(th)}$) ถ้าแรงดันระหว่างขาเกต และขาอีมีเตอร์ V_{GE} ต่ำกว่า $V_{GE(th)}$ จะทำให้ไอจีบีทีหยุดนำกระแสหรือคัตออฟ

ข.3 วงจรสมมูลของไอจีบีที



(ก) โครงสร้างที่มีบีเจทีและมอสเฟตกำลังแฝงอยู่



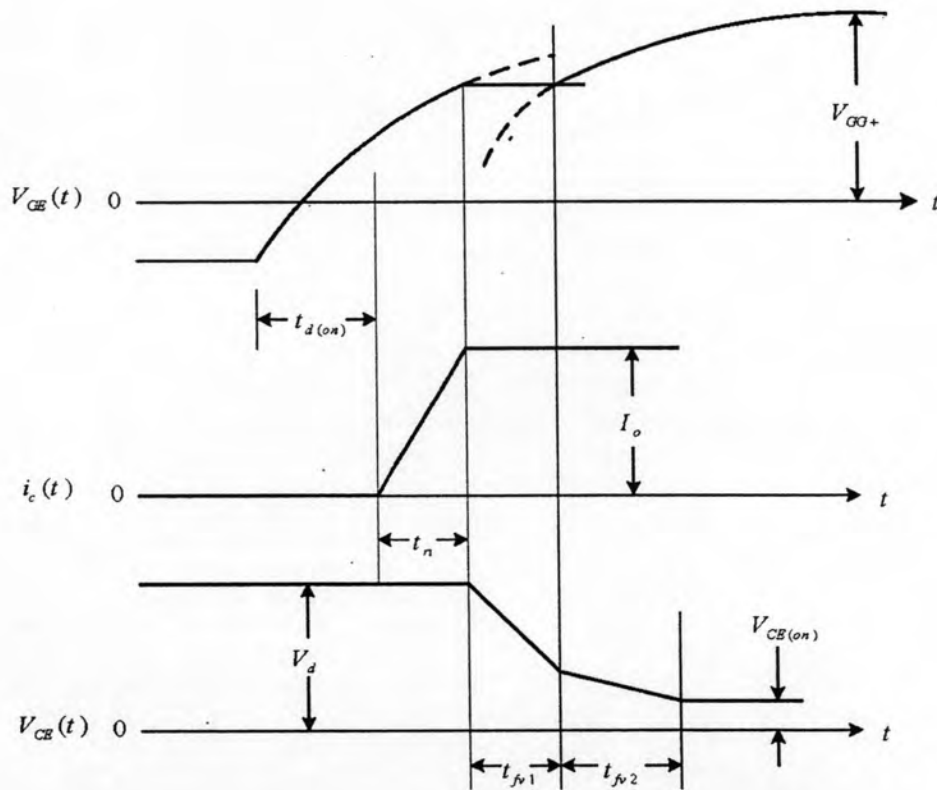
(ข) วงจรสมมูลของไอจีบีที

รูปที่ ข.4 โครงสร้างที่มีบีเจทีและมอสเฟตกำลังแฝงอยู่และวงจรสมมูลของไอจีบีที

จากรูปที่ ข.4 (ก) เมื่อพิจารณาโครงสร้างภายในของไอจีบีทีจะพบว่ามีการนำซิสเตอร์แบบ PNP และมอสเฟตกำลังแบบ NPN รวมถึงมีความต้านทานแฝงซึ่งสามารถเขียนเป็นวงจรสมมูลได้ ดังรูปที่ ข.4 (ข)

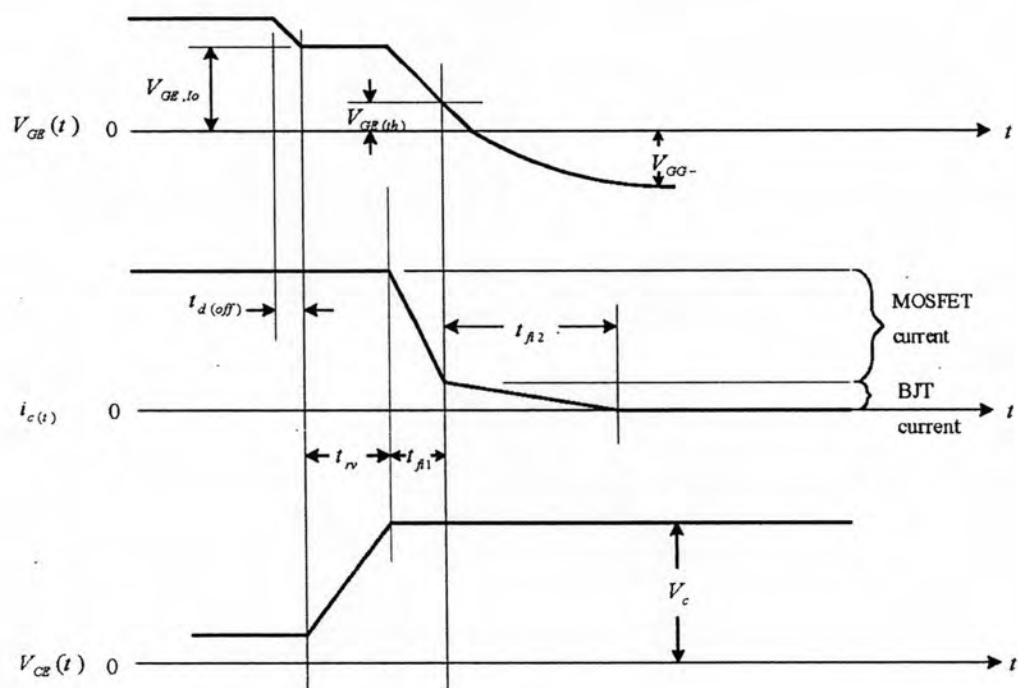
ข.4 คุณลักษณะการสวิตช์

รูปคลื่นของกระแสและแรงดันของไอจีบีทีเมื่อเริ่มนำกระแสแสดงในรูปที่ ข.5 ซึ่งมีลักษณะคล้ายคลึงกับมอสเฟตกำลัง โดยช่วงเวลาประวิง $t_{d(on)}$ เป็นเวลาที่ V_{GS} เริ่มเพิ่มขึ้นจาก $-V_{GS}$ จนมีค่าเท่ากับ $V_{GS(th)}$ ในช่วงนี้กระแสคอลเลกเตอร์ยังมีค่าเป็นศูนย์ ช่วงเวลาขึ้น t_n กระแสเดรนจะเริ่มเพิ่มจากศูนย์จนถึง I_o จากนั้นกระแสเดรนจะมีค่าคงที่ แต่แรงดัน V_{CE} จะลดลงจนมีค่าเท่ากับ $V_{CE(on)}$ ซึ่งจะใช้เวลา $t_{fv1} + t_{fv2}$ โดย t_{fv1} เป็นช่วงทำงานในย่านความต้านทานสูง ส่วน t_{fv2} เป็นช่วงการทำงานในย่านความต้านทานต่ำ



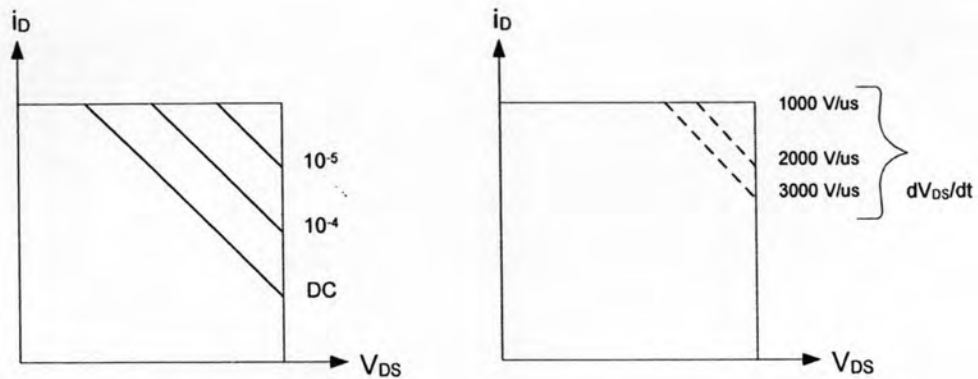
รูปที่ ข.5 คลื่นกระแสและแรงดันในสภาวะเริ่มนำกระแสของไอจีบีที

รูปคลื่นของกระแสและแรงดันของไอจีบีทีเมื่อเริ่มหยุดนำกระแสแสดงในรูปที่ ข.6 โดยในช่วงแรก $t_{d(off)}$ กระแสคอลเลกเตอร์ยังมีค่าคงที่ต่อมาเป็นช่วงเวลา t_{rv} เป็นช่วงเวลาที่แรงดัน V_{CE} เริ่มเพิ่มขึ้นจนถึง V_c จากนั้นกระแสคอลเลกเตอร์จะลดลงจนกระทั่งเป็นศูนย์ ซึ่งจะใช้เวลา $t_{fv1} + t_{fv2}$ โดย t_{fv1} เป็นช่วงหยุดนำกระแสของมอสเฟตกำลังภายในไอจีบีที ส่วน t_{fv2} เป็นช่วงหยุดนำกระแสของบีเจทีซึ่งจะใช้เวลานานกว่าช่วง t_{fv1}



รูปที่ ข.6 คลื่นกระแสและแรงดันในสภาวะเริ่มหยุดนำกระแสของไอจีบีที

ข.5 พื้นที่ทำงานปลอดภัย (Safe Operating Area; SOA)



(ก) ขณะ Forward Bias

(ข) ขณะ Reverse Bias

รูปที่ ข.7 พื้นที่ทำงานปลอดภัยของไอจีบีที

จากรูปที่ ข.7 (ก) เป็นพื้นที่ทำงานปลอดภัยขณะไบแอสไปหน้า ซึ่งมีลักษณะคล้ายคลึงกับ มอสเฟตกำลัง แต่จะทำงานได้ในช่วงพื้นที่ที่กว้างกว่าเมื่อเวลาในการสวิตช์เท่ากัน พื้นที่ทำงาน ปลอดภัยจะเกือบเป็นสี่เหลี่ยมมากขึ้นเมื่อเวลาในการสวิตช์น้อยๆ ในขณะที่ไอจีบีทีไบแอสไปหน้า จุดทำงานจะต้องอยู่ภายในพื้นที่ทำงานปลอดภัย ไม่เช่นนั้นแล้วจะทำให้ไอจีบีทีได้รับความเสียหาย และจากรูปที่ ข.7 (ข) เป็นพื้นที่ทำงานปลอดภัยขณะไบแอสย้อนกลับ จะมีขีดจำกัดค่าของ อัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันต่อเวลา ซึ่งจะเกิดในช่วงหยุดนำกระแส ถ้าอัตราการเปลี่ยนแปลง แรงดันต่อเวลามีค่าสูงขึ้นพื้นที่ทำงานปลอดภัยจะน้อยลง

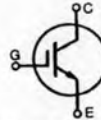
ภาคผนวก ค

ตารางแสดงคุณสมบัติ IGBT เบอร์ IXEL40N400

Very High Voltage
IGBT

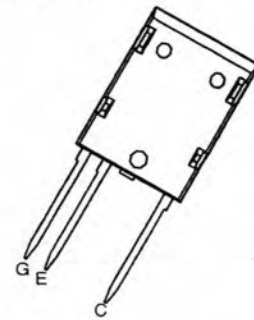
IXEL40N400

$V_{CES} = 4000 \text{ V}$
 $I_{C90} = 40 \text{ A}$
 $V_{CE(sat)} = 4.0 \text{ V}$
 $t_{fi(typ)} = 450 \text{ ns}$



Symbol	Test Conditions	Maximum Ratings
V_{CES}	$T_J = 25^\circ\text{C}$ to 125°C	4000 V
V_{GES}	Continuous	± 20 V
I_{C90}	$T_C = 90^\circ\text{C}$	40 A
I_{CM}	Limited by T_J	170 A
P_C	$T_C = 25^\circ\text{C}$	380 W
T_J		-40 ... +125 $^\circ\text{C}$
T_{JM}		125 $^\circ\text{C}$
T_{stg}		-40 ... +125 $^\circ\text{C}$
	Maximum Lead temperature for soldering 1.6 mm (0.062 in.) from case for 10 s	300 $^\circ\text{C}$
	Maximum Tab temperature for soldering SMD devices for 10 s	260 $^\circ\text{C}$
F_C	Mounting Force	30 . 170 / 7 . 36 N/lb
V_{ISOL}	$I_{ISOL} < 1 \text{ mA}$, 50/60 Hz, $t = 1 \text{ minute}$	2500 V~
Weight		10 g

ISOPLUS I5 (HV)



Features

- High current handling capability
- MOS Gate turn-on
- drive simplicity
- Rugged NPT structure
- Molding epoxies meet UL 94 V-0 flammability classification

Applications

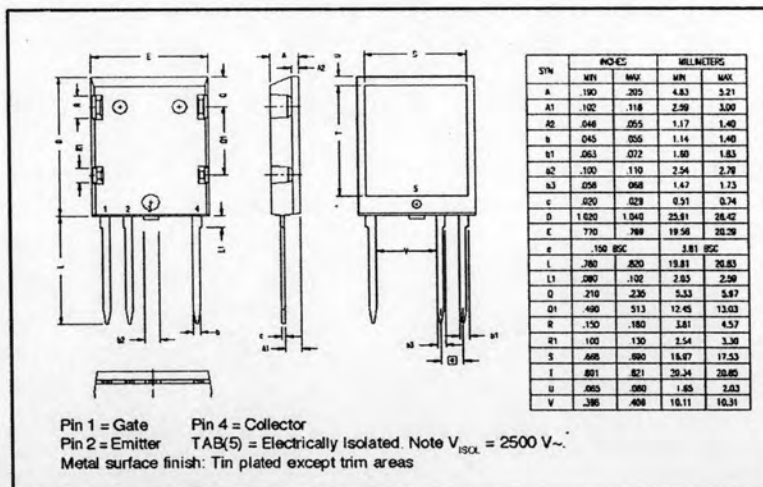
- Capacitor discharge
- Pulsar circuits

Symbol	Test Conditions	Characteristic Values ($T_J = 25^\circ\text{C}$, unless otherwise specified)		
		min.	typ.	max.
$V_{GE(th)}$	$I_C = 10 \text{ mA}$, $V_{CE} = V_{GE}$	6.0		7.5 V
I_{CES}	$V_{CE} = 4000 \text{ V}$ $V_{GE} = 0 \text{ V}$ $T_J = 125^\circ\text{C}$		1.5	100 μA mA
I_{GES}	$V_{CE} = 0 \text{ V}$, $V_{GE} = \pm 20 \text{ V}$			$\pm 500 \text{ nA}$
$V_{CE(sat)}$	$I_C = I_{C90}$, $V_{GE} = 15 \text{ V}$ $T_J = 125^\circ\text{C}$		3.0 3.9	4.0 V V

ตารางแสดงคุณสมบัติ IGBT เบอร์ IXEL40N400 (ต่อ)

Symbol	Test Conditions	Characteristic Values ($T_j = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise specified)		
		min.	typ.	max.
g_{fs}	$I_C = I_{C90}, V_{CE} = 10\text{ V}$		21	S
I_{SC}	$V_{CC} = 3400\text{ V}, V_{CM} < 4000\text{ V}, V_{GE} = 15\text{ V}$ $T_j = 125^\circ\text{C}, t_{SC} <= 10\ \mu\text{s}$		175	A
C_{ies}			7450	pF
C_{oes}	$V_{CE} = 25\text{ V}, V_{GE} = 0\text{ V}, f = 1\text{ MHz}$		280	pF
C_{res}			70	pF
Q_{gf}	$I_C = I_{C90}, V_{GE} = 15\text{ V}, V_{CE} = 0.5 V_{CES}$		310	nC
R_{Qint}			5	Ω
$t_{d(on)}$	Inductive load		170	ns
t_{ri}	$I_C = I_{C90}, V_{GE} = \pm 15\text{ V}$		100	ns
E_{on}	$V_{CE} = 2800\text{ V}, R_G = 33\ \Omega$		54	mJ
$t_{d(off)}$			660	ns
t_s			450	ns
E_{off}			170	mJ
$t_{d(on)}$	Inductive load, $T_j = 125^\circ\text{C}$		165	ns
t_{ri}	$I_C = I_{C90}, V_{GE} = \pm 15\text{ V}$		105	ns
E_{on}	$V_{CE} = 2800\text{ V}, R_G = 33\ \Omega$		72	mJ
$t_{d(off)}$			750	ns
t_s			480	ns
E_{off}			22	mJ
R_{thJC}				0.33 K/W
R_{thCK}	(Pressure mount)		0.15	K/W

ISOPLUS i5 HV Outline



IXYS reserves the right to change limits, test conditions, and dimensions.

ตารางแสดงคุณสมบัติ IGBT เบอร์ IXEL40N400 (ต่อ)

Fig. 1. Output Characteristics @ 25 °C

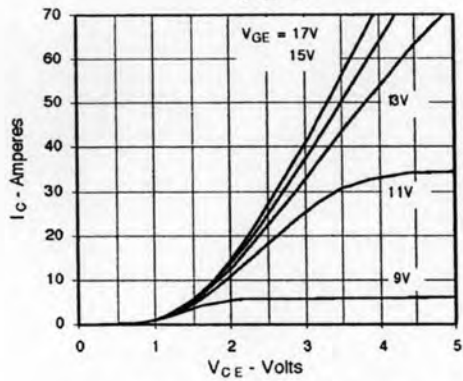


Fig. 2. Extended Output Characteristics @ 25 °C

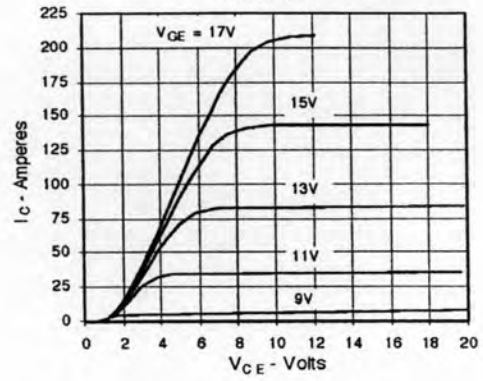


Fig. 3. Output Characteristics @ 125 °C

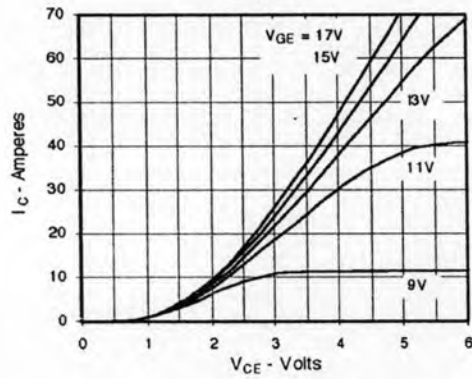


Fig. 4. Dependence of $V_{CE(sat)}$ on Temperature

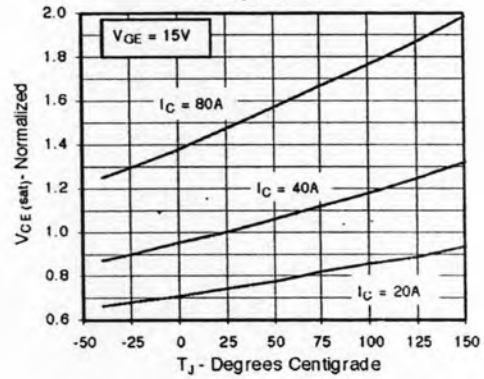


Fig. 5. Collector-to-Emitter Voltage vs. Gate-to-Emitter voltage

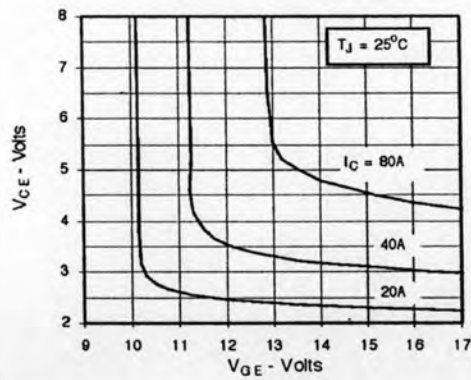
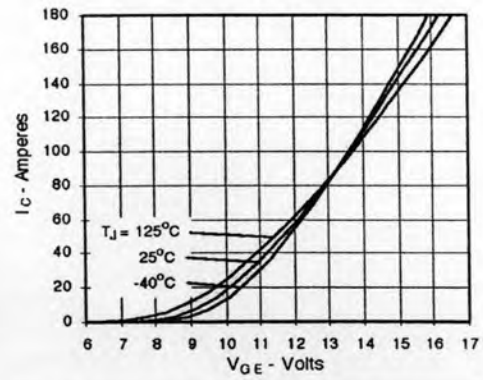


Fig. 6. Input Admittance



ตารางแสดงคุณสมบัติ IGBT เบอร์ IXEL40N400 (ต่อ)

Fig. 7. Transconductance

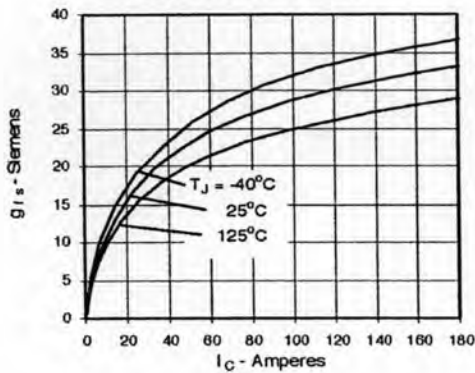


Fig. 8. Turn-on & Turn-off Energies vs. Collector Current

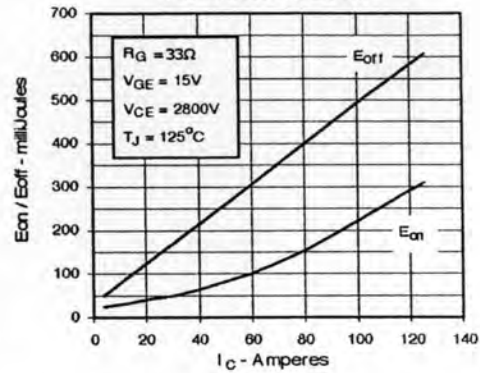


Fig. 9. Turn-on & Turn-off Energies vs. Gate Resistance

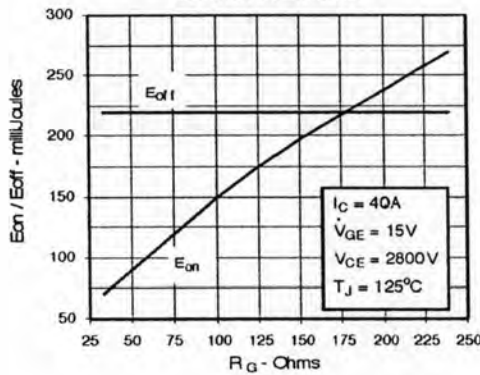


Fig. 10. Gate Charge

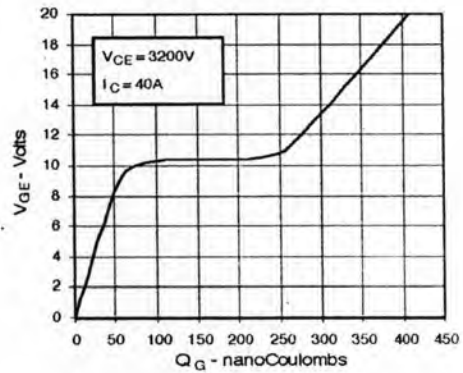


Fig. 11. Capacitance

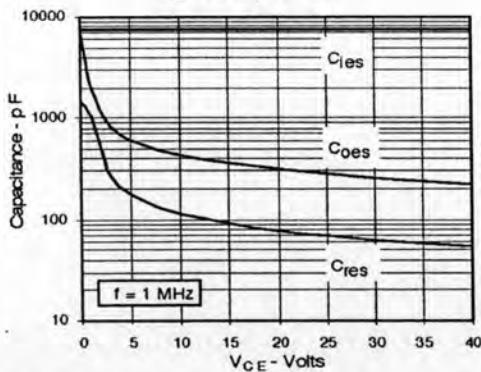
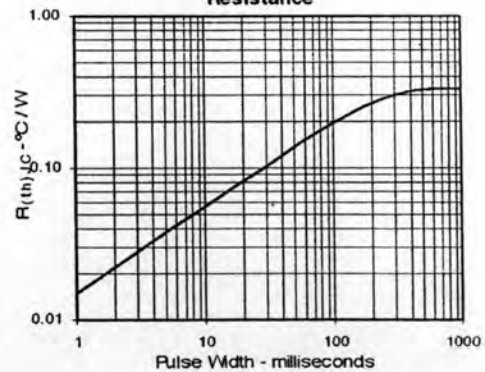


Fig. 12. Maximum Transient Thermal Resistance



IXYS reserves the right to change limits, test conditions, and dimensions.

ภาคผนวก ง

ตารางแสดงคุณสมบัติ IGBT เบอร์ IRG4PH40UD

International
IR Rectifier

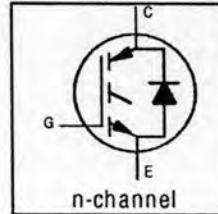
PD- 91621B

IRG4PH40UD

INSULATED GATE BIPOLAR TRANSISTOR WITH UltraFast CoPack IGBT
ULTRAFast SOFT RECOVERY DIODE

Features

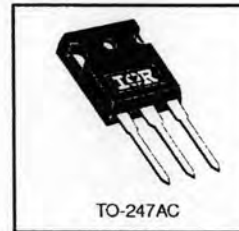
- UltraFast: Optimized for high operating frequencies up to 40 kHz in hard switching, >200 kHz in resonant mode
- New IGBT design provides tighter parameter distribution and higher efficiency than previous generations
- IGBT co-packaged with HEXFRED™ ultrafast, ultra-soft-recovery anti-parallel diodes for use in bridge configurations
- Industry standard TO-247AC package



$V_{CES} = 1200V$
$V_{CE(on)} \text{ typ.} = 2.43V$
@ $V_{GE} = 15V, I_C = 21A$

Benefits

- Higher switching frequency capability than competitive IGBTs
- Highest efficiency available
- HEXFRED diodes optimized for performance with IGBT's. Minimized recovery characteristics require less/no snubbing



Absolute Maximum Ratings

Parameter	Max.	Units
V_{CES} Collector-to-Emitter Breakdown Voltage	1200	V
$I_C @ T_C = 25^\circ C$ Continuous Collector Current	41	A
$I_C @ T_C = 100^\circ C$ Continuous Collector Current	21	
I_{CM} Pulsed Collector Current Φ	82	
I_{LM} Clamped Inductive Load Current Φ	82	
$I_F @ T_C = 100^\circ C$ Diode Continuous Forward Current	8.0	
I_{FM} Diode Maximum Forward Current	130	V
V_{GE} Gate-to-Emitter Voltage	± 20	
$P_D @ T_C = 25^\circ C$ Maximum Power Dissipation	160	W
$P_D @ T_C = 100^\circ C$ Maximum Power Dissipation	65	
T_J Operating Junction and	-55 to +150	°C
T_{STG} Storage Temperature Range		
Soldering Temperature, for 10 seconds	300 (0.063 in. (1.6mm) from case)	
Mounting torque, 6-32 or M3 screw.	10 lbf-in (1.1N-m)	

Thermal Resistance

Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units
$R_{\theta JC}$ Junction-to-Case - IGBT	—	—	0.77	°C/W
$R_{\theta JC}$ Junction-to-Case - Diode	—	—	1.7	
$R_{\theta CS}$ Case-to-Sink, flat, greased surface	—	0.24	—	
$R_{\theta JA}$ Junction-to-Ambient, typical socket mount	—	—	40	
Wt Weight	—	6 (0.21)	—	g (oz)

ตารางแสดงคุณสมบัติ IGBT เบอร์ IRG4PH40UD (ต่อ)

IRG4PH40UD

International
IGR Rectifier

Electrical Characteristics @ $T_J = 25^\circ\text{C}$ (unless otherwise specified)

Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
$V_{(BR)CES}$	1200	—	—	V	$V_{GE} = 0V, I_C = 250\mu\text{A}$
$\Delta V_{(BR)CES}/\Delta T_J$	—	0.43	—	V/°C	$V_{GE} = 0V, I_C = 1.0\text{mA}$
$V_{CE(on)}$	—	2.43	3.1	V	$I_C = 21A, V_{GE} = 15V$ $I_C = 41A, V_{GE} = 15V$ $I_C = 21A, T_J = 150^\circ\text{C}$ See Fig. 2, 5
$V_{GE(th)}$	3.0	—	6.0	V	$V_{CE} = V_{GE}, I_C = 250\mu\text{A}$
$\Delta V_{GE(th)}/\Delta T_J$	—	-11	—	mV/°C	$V_{CE} = V_{GE}, I_C = 250\mu\text{A}$
g_{fe}	16	24	—	S	$V_{CE} = 100V, I_C = 21A$
I_{CES}	—	—	250	μA	$V_{GE} = 0V, V_{CE} = 600V$ $V_{GE} = 0V, V_{CE} = 600V, T_J = 150^\circ\text{C}$
V_{FM}	—	2.6	3.3	V	$I_C = 8.0A$ $I_C = 8.0A, T_J = 125^\circ\text{C}$ See Fig. 13
I_{GES}	—	—	± 100	nA	$V_{GE} = \pm 20V$

Switching Characteristics @ $T_J = 25^\circ\text{C}$ (unless otherwise specified)

Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
Q_g	—	86	130	nC	$I_C = 21A$ $V_{CC} = 400V$ $V_{GE} = 15V$ See Fig. 8
Q_{ge}	—	13	20	nC	
Q_{gc}	—	29	44	nC	
$t_{d(on)}$	—	46	—	ns	$T_J = 25^\circ\text{C}$ $I_C = 21A, V_{CC} = 800V$ $V_{GE} = 15V, R_G = 10\Omega$ Energy losses include 'tail' and diode reverse recovery.
t_r	—	35	—	ns	
$t_{d(off)}$	—	97	150	ns	
t_f	—	240	360	ns	
E_{on}	—	1.80	—	mJ	
E_{off}	—	1.93	—	mJ	
E_{ts}	—	3.73	4.6	mJ	
$t_{d(on)}$	—	42	—	ns	$T_J = 150^\circ\text{C}$, See Fig. 11, 18 $I_C = 21A, V_{CC} = 800V$ $V_{GE} = 15V, R_G = 10\Omega$ Energy losses include 'tail' and diode reverse recovery.
t_r	—	32	—	ns	
$t_{d(off)}$	—	240	—	ns	
t_f	—	510	—	ns	
E_{ts}	—	7.04	—	mJ	
L_E	—	13	—	nH	Measured 5mm from package
C_{ies}	—	1800	—	pF	$V_{GE} = 0V$ $V_{CC} = 30V$ See Fig. 7
C_{oes}	—	120	—	pF	
C_{res}	—	18	—	pF	$f = 1.0\text{MHz}$
t_{rr}	—	63	95	ns	$T_J = 25^\circ\text{C}$ See Fig. 14 $T_J = 125^\circ\text{C}$ 14
I_{rr}	—	4.5	8.0	A	$T_J = 25^\circ\text{C}$ See Fig. 15 $T_J = 125^\circ\text{C}$ 15
Q_{rr}	—	140	380	nC	$T_J = 25^\circ\text{C}$ See Fig. 16 $T_J = 125^\circ\text{C}$ 16
$di_{(rec)}/dt$	—	133	—	A/ μs	$T_J = 25^\circ\text{C}$ See Fig. 17 $T_J = 125^\circ\text{C}$ 17

ตารางแสดงคุณสมบัติ IGBT เบอร์ IRG4PH40UD (ต่อ)

International
IGBT Rectifier

IRG4PH40UD

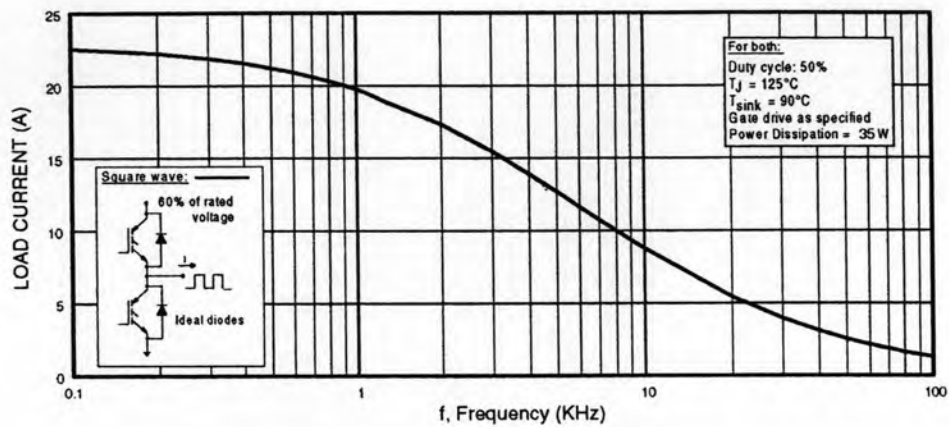


Fig. 1 - Typical Load Current vs. Frequency
(Load Current = I_{RMS} of fundamental)

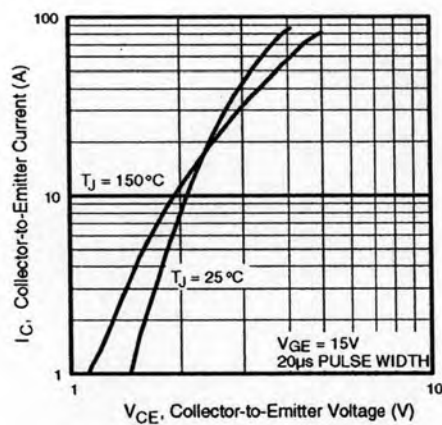


Fig. 2 - Typical Output Characteristics

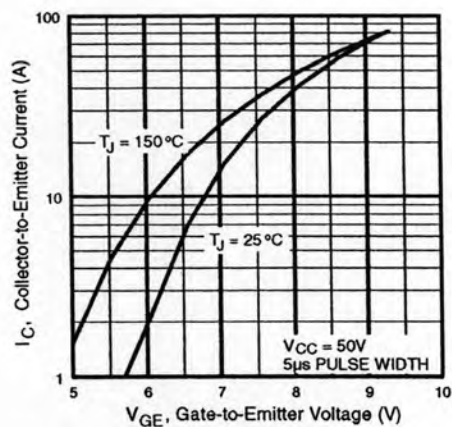


Fig. 3 - Typical Transfer Characteristics

ตารางแสดงคุณสมบัติ IGBT เบอร์ IRG4PH40UD (ต่อ)

IRG4PH40UD

International
IGBT Rectifier

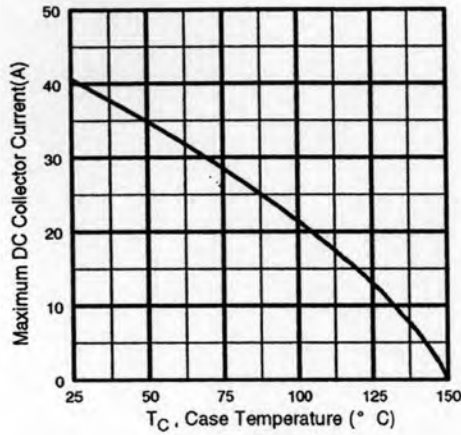


Fig. 4 - Maximum Collector Current vs. Case Temperature

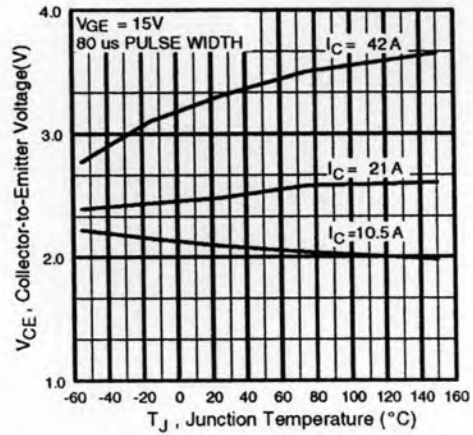


Fig. 5 - Typical Collector-to-Emitter Voltage vs. Junction Temperature

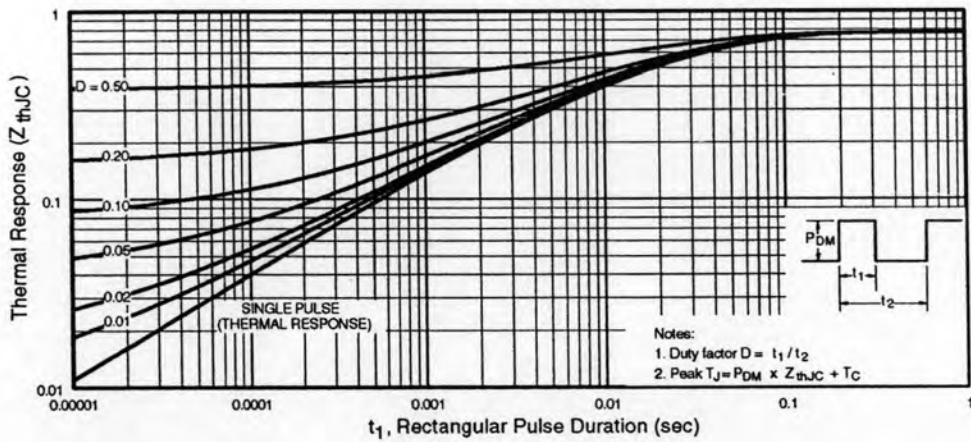


Fig. 6 - Maximum Effective Transient Thermal Impedance, Junction-to-Case

ตารางแสดงคุณสมบัติ IGBT เบอร์ IRG4PH40UD (ต่อ)

International
IR Rectifier

IRG4PH40UD

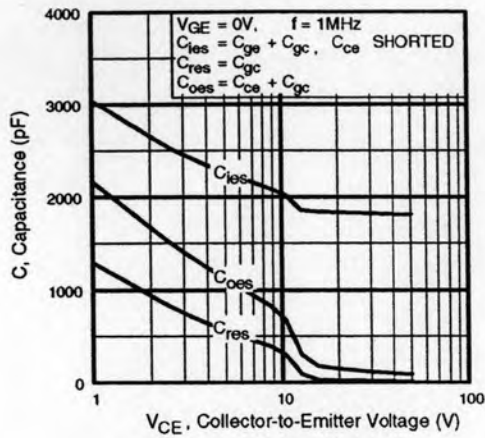


Fig. 7 - Typical Capacitance vs. Collector-to-Emitter Voltage

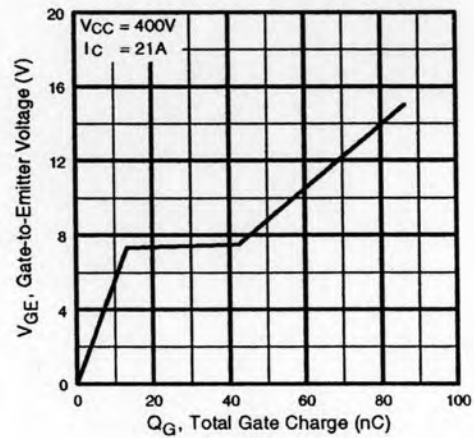


Fig. 8 - Typical Gate Charge vs. Gate-to-Emitter Voltage

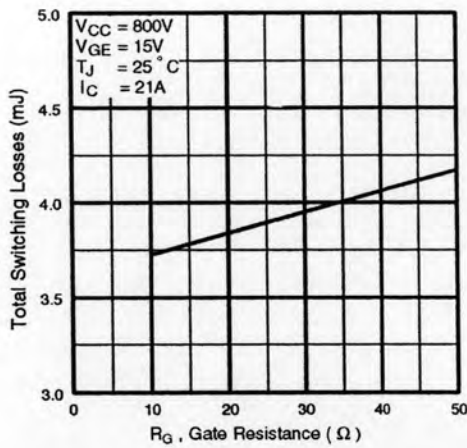


Fig. 9 - Typical Switching Losses vs. Gate Resistance

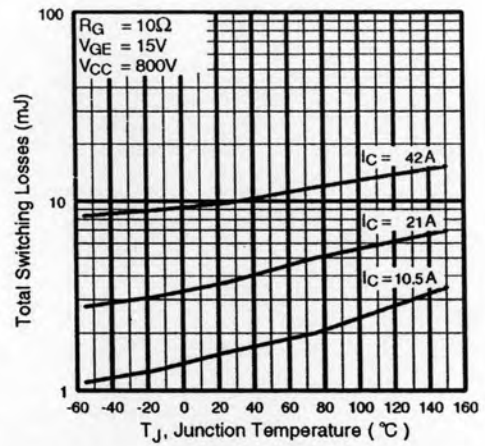


Fig. 10 - Typical Switching Losses vs. Junction Temperature

ตารางแสดงคุณสมบัติ IGBT เบอร์ IRG4PH40UD (ต่อ)

IRG4PH40UD

International
IGBT Rectifier

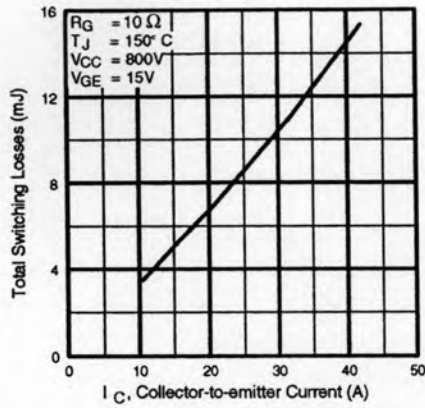


Fig. 11 - Typical Switching Losses vs. Collector-to-Emitter Current

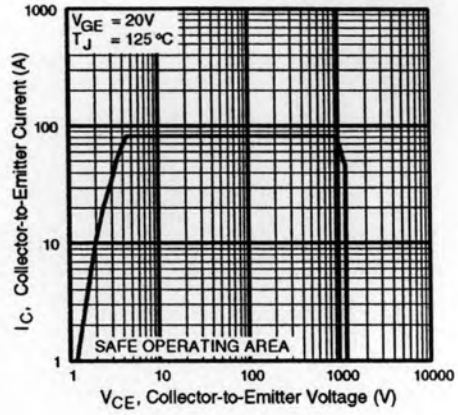


Fig. 12 - Turn-Off SOA

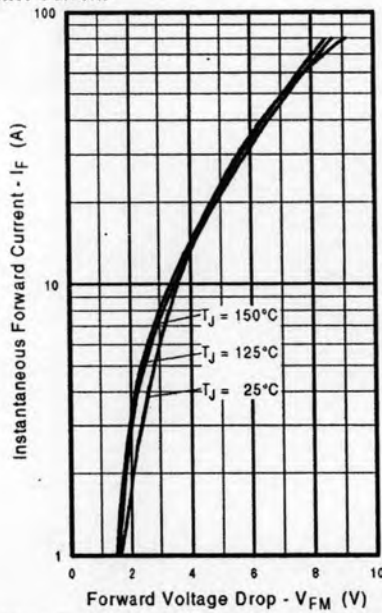


Fig. 13 - Maximum Forward Voltage Drop vs. Instantaneous Forward Current

ตารางแสดงคุณสมบัติ IGBT เบอร์ IRG4PH40UD (ต่อ)

International
IGBT Rectifier

IRG4PH40UD

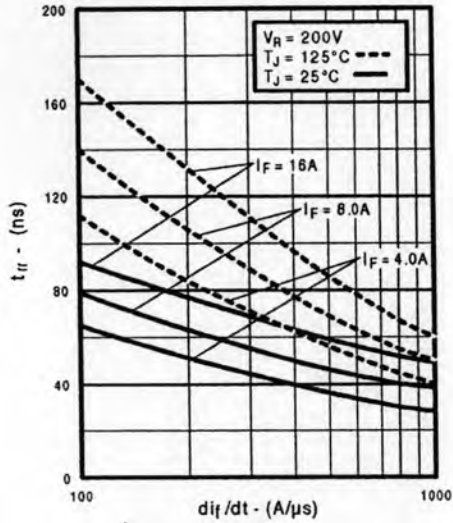


Fig. 14 - Typical Reverse Recovery vs. di/dt

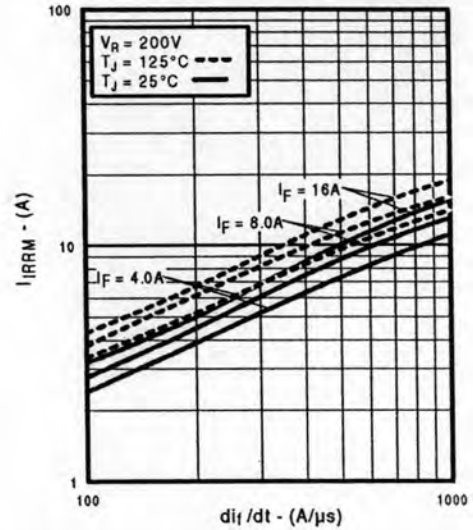


Fig. 15 - Typical Recovery Current vs. di/dt

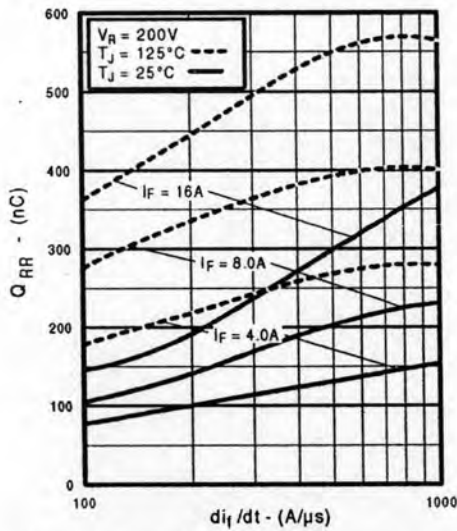


Fig. 16 - Typical Stored Charge vs. di/dt

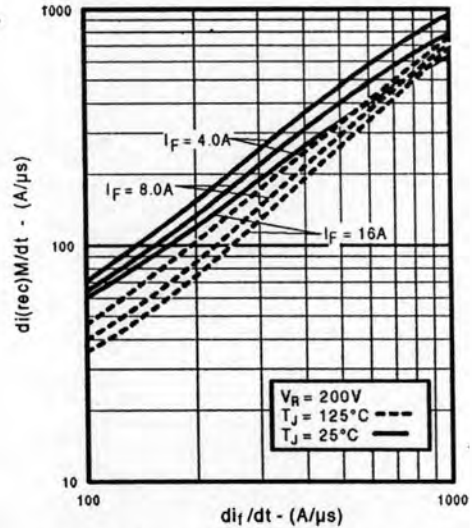


Fig. 17 - Typical $di_{(rec)M}/dt$ vs. di/dt

ตารางแสดงคุณสมบัติ IGBT เบอร์ IRG4PH40UD (ต่อ)

IRG4PH40UD

International
IGBT Rectifier

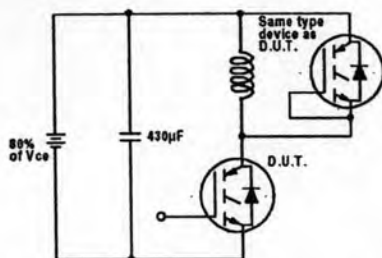


Fig. 18a - Test Circuit for Measurement of I_{LM} , E_{on} , $E_{off}(\text{diode})$, t_{rr} , Q_{rr} , I_{rr} , $t_{d(on)}$, t_r , $t_{d(off)}$, t_f

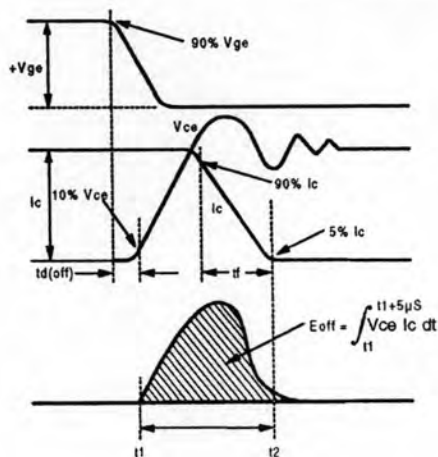


Fig. 18b - Test Waveforms for Circuit of Fig. 18a, Defining E_{off} , $t_{d(off)}$, t_f

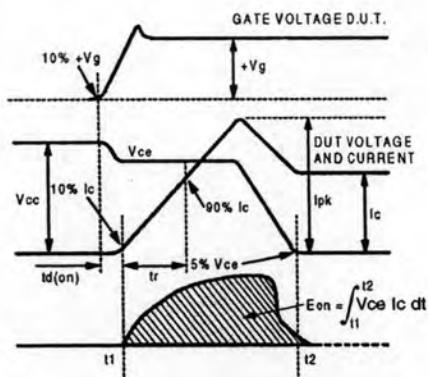


Fig. 18c - Test Waveforms for Circuit of Fig. 18a, Defining E_{on} , $t_{d(on)}$, t_r

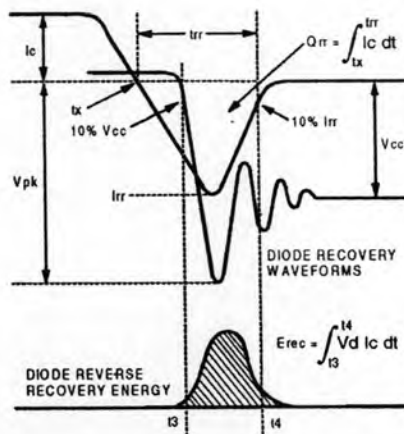


Fig. 18d - Test Waveforms for Circuit of Fig. 18a, Defining E_{rec} , t_{rr} , Q_{rr} , I_{rr}

ตารางแสดงคุณสมบัติ IGBT เบอร์ IRG4PH40UD (ต่อ)

International
IR Rectifier

IRG4PH40UD

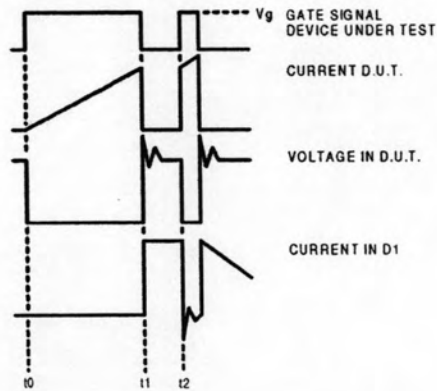


Figure 18e. Macro Waveforms for Figure 18a's Test Circuit

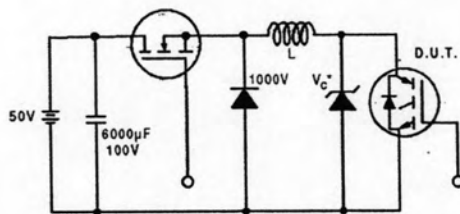


Figure 19. Clamped Inductive Load Test Circuit

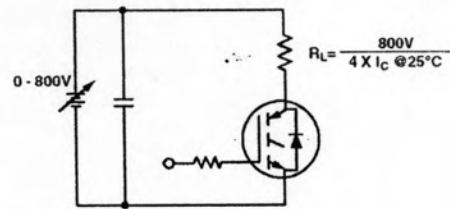


Figure 20. Pulsed Collector Current Test Circuit

ตารางแสดงคุณสมบัติ IGBT เบอร์ IRG4PH40UD (ต่อ)

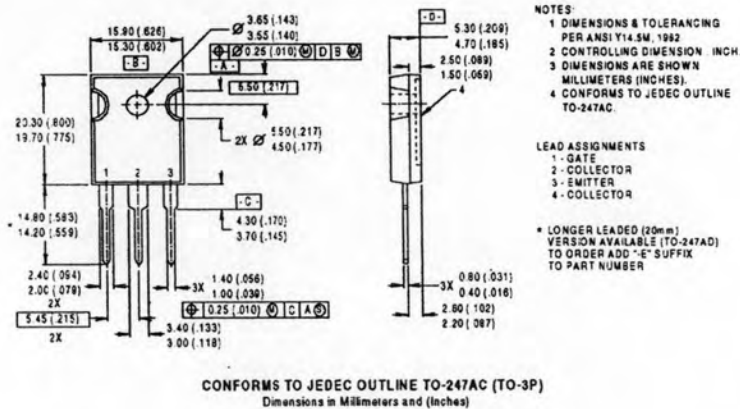
IRG4PH40UD

International
IR Rectifier

Notes:

- ① Repetitive rating: $V_{GE}=20V$; pulse width limited by maximum junction temperature (figure 20)
- ② $V_{CC}=80\%(V_{CES})$, $V_{GE}=20V$, $L=10\mu H$, $R_G=10\Omega$ (figure 19)
- ③ Pulse width $\leq 80\mu s$; duty factor $\leq 0.1\%$.
- ④ Pulse width $5.0\mu s$, single shot.

Case Outline — TO-247AC



International
IR Rectifier

IR WORLD HEADQUARTERS: 233 Kansas St., El Segundo, California 90245, USA Tel: (310) 252-7105
 IR EUROPEAN REGIONAL CENTRE: 439/445 Godstone Rd, Whyteleafe, Surrey CR3 0BL, UK Tel: ++ 44 (0)20 8645 8000
 IR CANADA: 15 Lincoln Court, Brampton, Ontario L6T3Z2, Tel: (905) 453 2200
 IR GERMANY: Saalburgstrasse 157, 61350 Bad Homburg Tel: ++ 49 (0) 6172 96590
 IR ITALY: Via Liguria 49, 10071 Borgaro, Torino Tel: ++ 39 011 451 0111
 IR JAPAN: K&H Bldg., 2F, 30-4 Nishi-Ikebukuro 3-Chome, Toshima-Ku, Tokyo 171 Tel: 81 (0)3 3983 0086
 IR SOUTHEAST ASIA: 1 Kim Seng Promenade, Great World City West Tower, 13-11, Singapore 237994 Tel: ++ 65 (0)838 4630
 IR TAIWAN: 16 Fl. Suite D. 207, Sec. 2, Tun Haw South Road, Taipei, 10673 Tel: 886-(0)2 2377 9936
 Data and specifications subject to change without notice. 7/00

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายธนารัตน์ ตันมณีประเสริฐ เกิดเมื่อวันที่ 15 ตุลาคม พ.ศ. 2523 ที่อำเภอเมือง จังหวัดภูเก็ต สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ในปีการศึกษา 2547 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง แขนงวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ภาควิชาการศึกษาศาสตร์ วิทยาลัยสงขลานครินทร์ ในปีการศึกษา 2547