01026308

Power Electronics

(อิเล็กทรอนิกส์กำลัง)

KMITL MASTER CLASS

รศ.ดร.อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ

Power Electronics

(อิเล็กทรอนิกส์กำลัง)

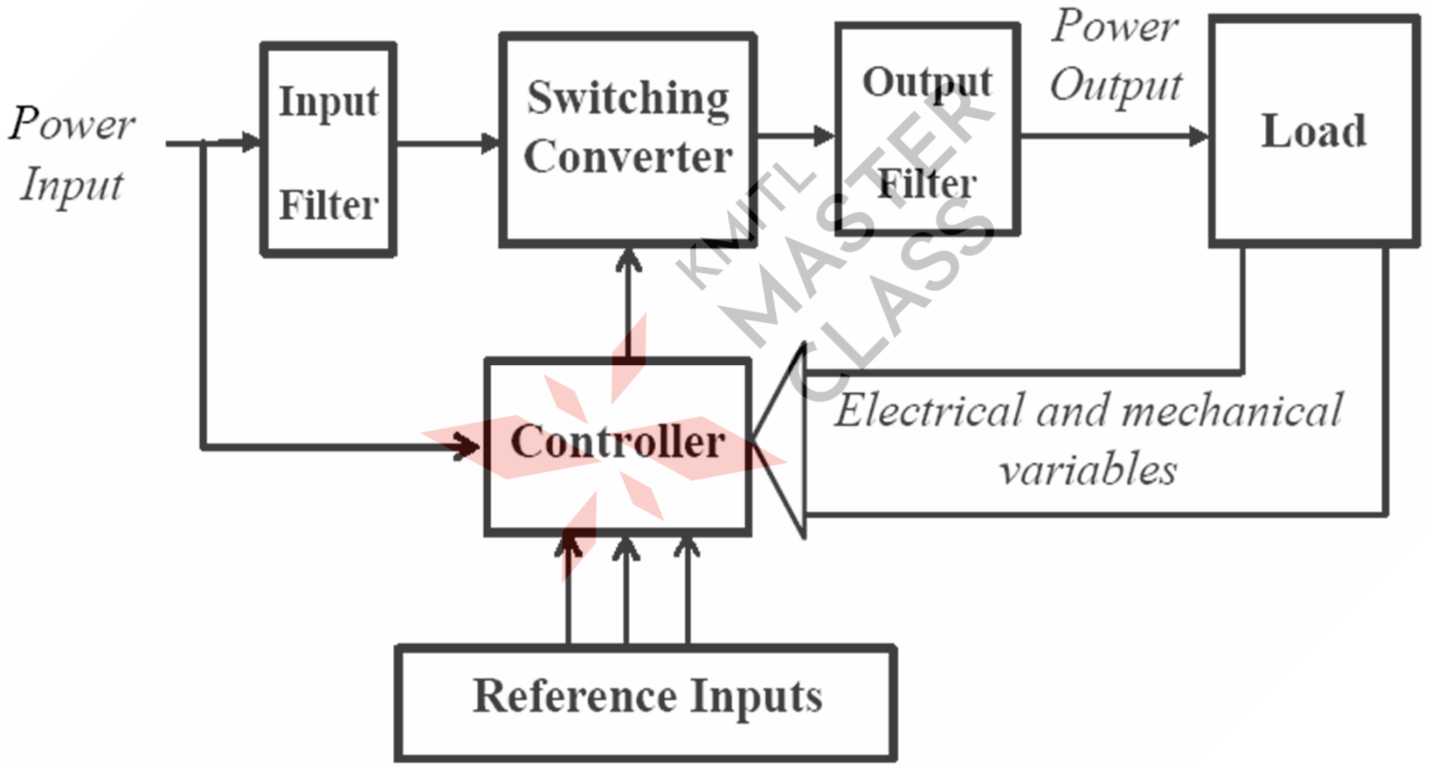
- คือวิชาที่คำนึงถึงการเปลี่ยนรูปพลังงานหรือกำลังงานโดยอาศัยอุปกรณ์(Device)ที่อยู่ในชุด Converter

เนื้อหา

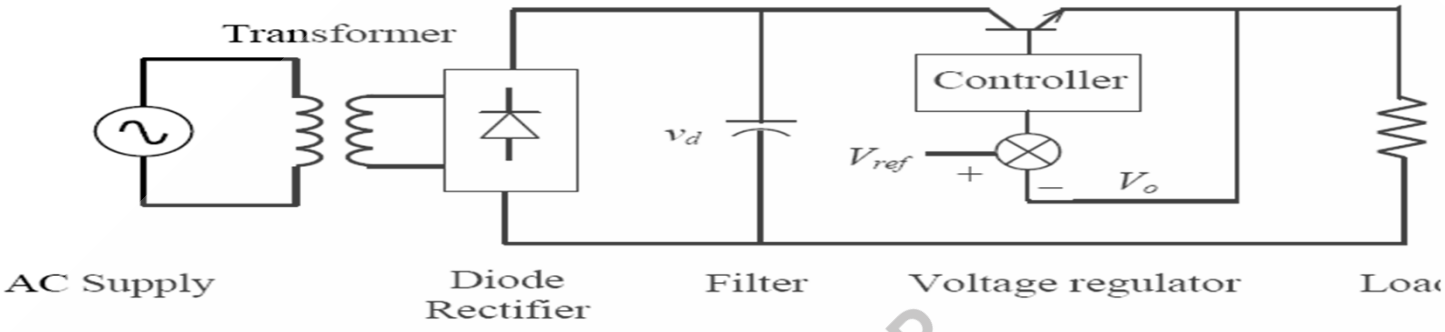
- นิยามในระบบไฟฟ้า
- Devices
- Converter
  - AC-DC Converter (Rectifier)
  - AC-AC Converter (AC voltage Controller)
  - DC-DC Converter (DC Chopper)
  - DC-AC Converter (Inverter)
- วงจรควบคุม
- การประยุกต์การใช้งาน

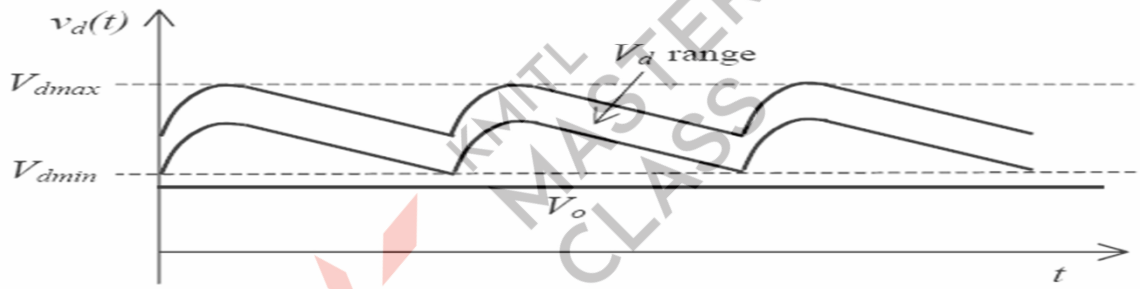
KMITL MASTER CLASS

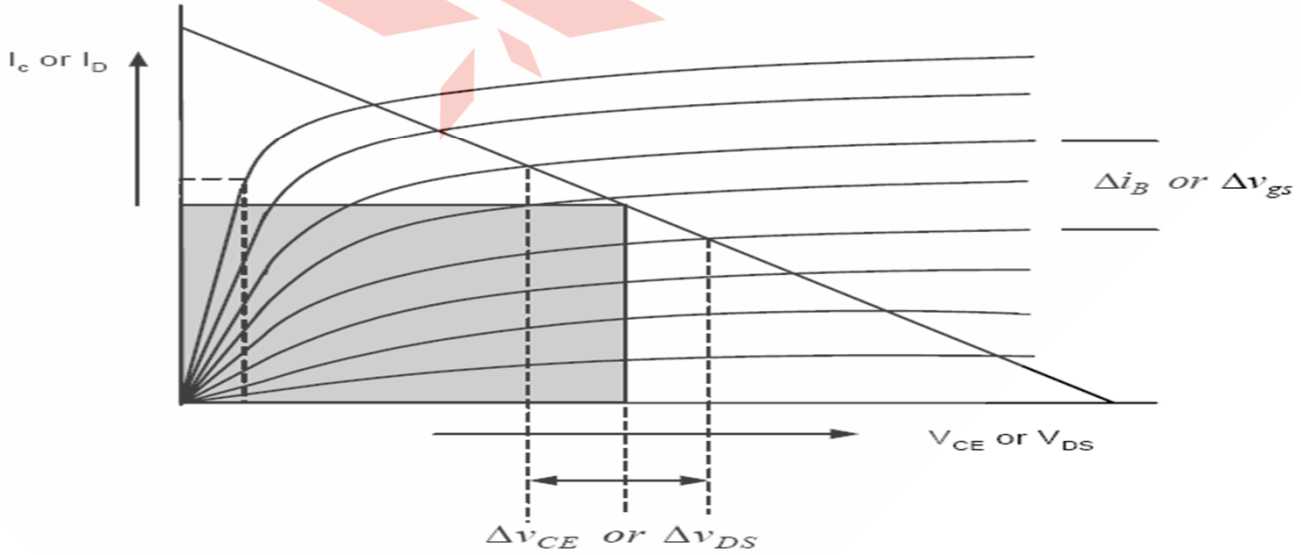
บทบาทของอิเล็กทรอนิกส์กำลัง



วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์โหมด

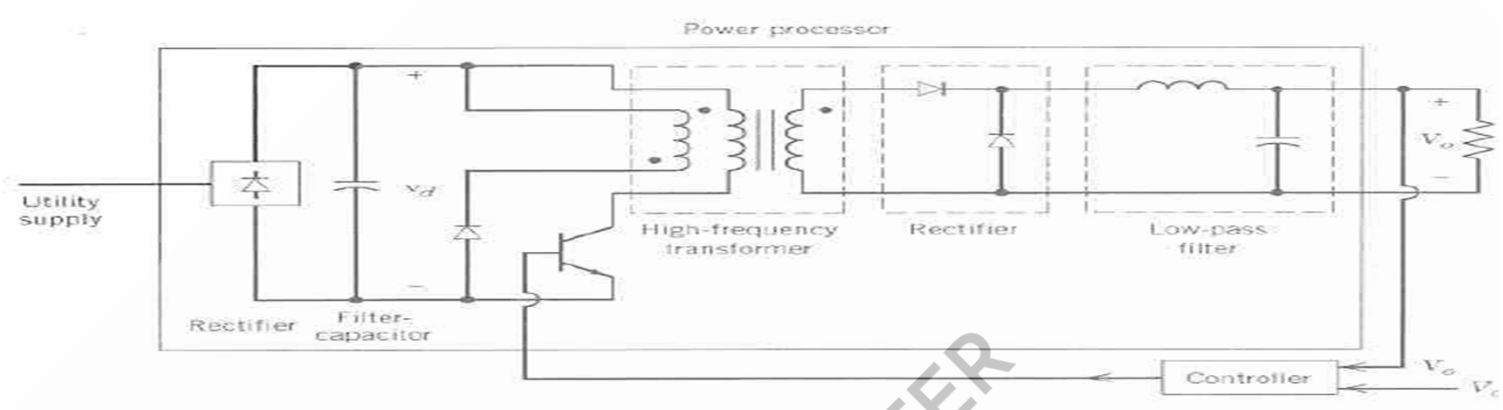


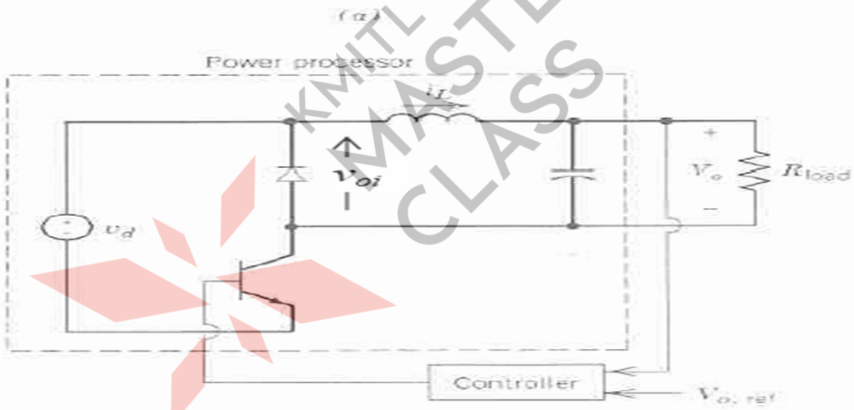


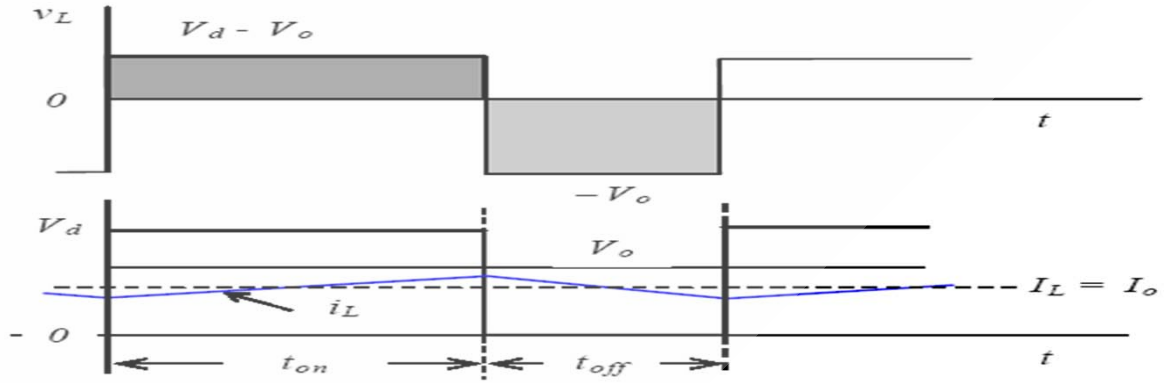


KMITL MASTER CLASS

ตัวอย่างของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์โหมด







การประยุกต์ใช้งานของวงจรคอนเวอร์เตอร์

Residential	*Transportation*
Refrigeration	Electric trains, trams, vehicles
Space heating	Battery chargers
Air conditioning	Subways
Cooking	Conveyor systems
Lighting	Rapid transit systems
Power supplies for consumer products	
Computers	
Commercial	*Utility Systems*
Heating, ventilating, airconditioning	High-voltage DC-DC transmission
Refrigeration	Static VAR compensation
Lighting	Renewable energy sources (wind, PV, fuel cells)
Computers & office equipment	Boiler feed systems
Uninterruptible power supplies	Energy storage
Elevators	
Industrial	*Aerospace*
Pumps	Space vehicle power systems
Compressors	Satellite power systems
Blowers and fans	Aircraft power systems
Machine tools	Aircraft controls
Arc and induction furnaces	
Lighting	*Telecommunications*
Welding	Battery chargers
Process plants	Power supplies

KMITL MASTER CLASS

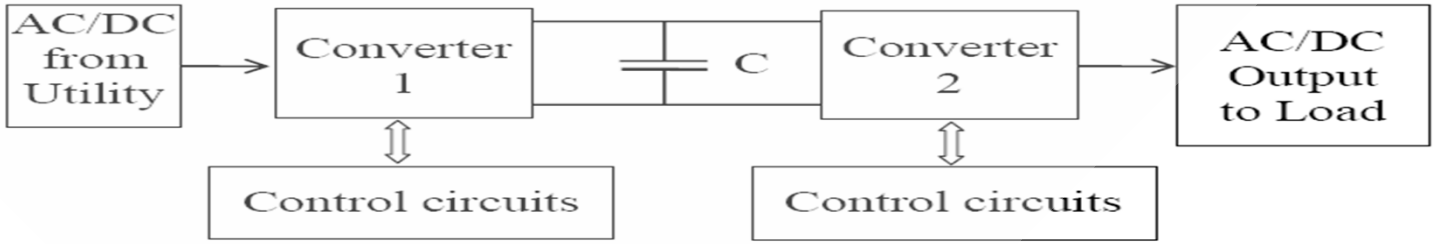
ชนิดของวงจรคอนเวอร์เตอร์

1. AC - DC (uncontrolled)
2. AC - DC (controlled)
3. DC - DC (non isolated)
4. DC - DC (isolated)
5. DC – AC
6. Hard switched & soft switched
7. Resonant
8. AC-AC

AC-DC Converter
AC-AC Converter
DC-DC Converter
DC-AC Converter

KMITL MASTER CLASS

Single-stage conversion



Two-stage conversion

Semiconductor Devices *สามารถแบ่งออกเป็น* **2** *กลุ่มตามความสามารถในการควบคุมการทำงาน*

1. Uncontrollable Switches (Diodes)

   นำกระแสและหยุดนำกระแสด้วยวงจรกำลัง

   Ex. Bipolar Diodes, Schottky Barrier Diodes

2. Controllable Switches

   นำกระแสด้วยสัญญาณควบคุม แต่หยุดนำกระแสด้วยวงจรกำลัง

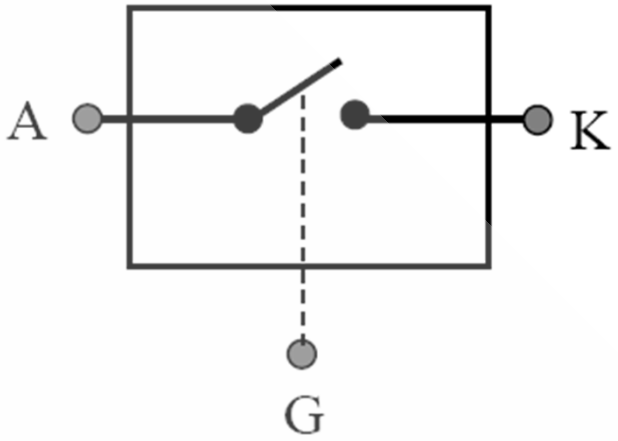
   Ex. SCRs, Triac

   นำกระแสและหยุดนำกระแสด้วยสัญญาณควบคุม

   Ex. GTOs, BJTs, Power MOSFETs & IGBTs

KMITL MASTER CLASS

อุปกรณ์สวิตชิ่ง

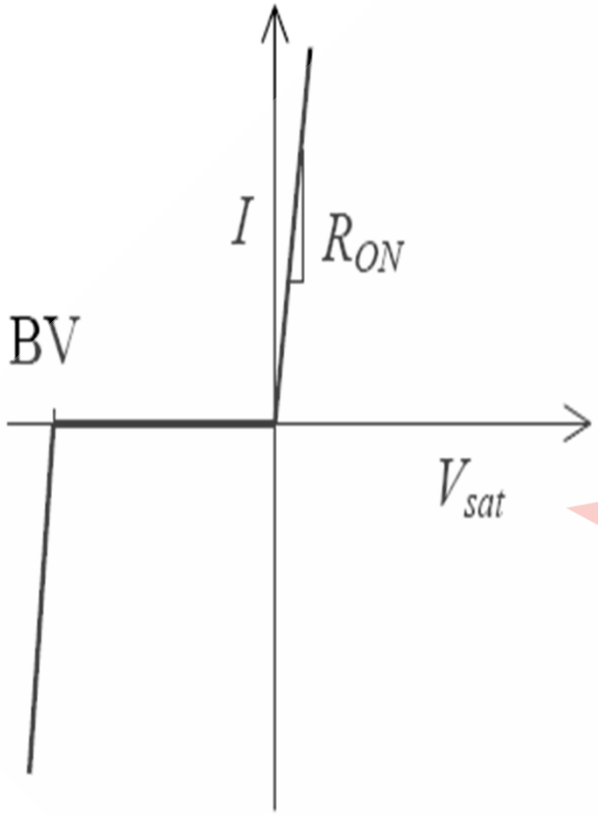


อุปกรณ์สวิตชิ่ง ที่ดีมีคุณสมบัติอะไรบ้าง

1. ไม่มีกำลังงานสูญเสียเมื่อนำกระแส
2. ไม่มีกำลังงานสูญเสียเมื่อหยุดนำกระแส
3. ไม่มีกำลังงานสูญเสียระหว่างการสวิตชิ่ง
4. สามารถควบคุมการนำกระแสได้สองทิศทาง
5. พิกัดแรงดันและกระแสเพียงพอ
6. ใช้เวลาในการเริ่มนำกระแสและหยุดนำกระแสน้อย

MITE MASTER CLASS

สิ่งสำคัญของอุปกรณ์สวิตชิ่ง



1. ทนแรงดันเบรกดาวน์ได้สูง (BV)
2. ค่าความต้านทานต่ำในช่วงนำกระแส
3. ใช้เวลาในการสวิตชิ่งเร็ว

อุปกรณ์สวิตชิ่งที่มีพาหะส่วนมาก เช่น MOSFET และไดโอด Schottky จะมีแรงดันเบรกดาวน์ต่ำเพื่อที่จะให้ค่าความต้านทานในช่วงนำกระแสเป็นที่ยอมรับได้

อุปกรณ์สวิตชิ่งที่มีพาหะส่วนน้อย เช่น BJT , IGBT , GTO , SCR MCT จะมีความต้านทานในช่วงนำกระแสต่ำ เพราะว่าพาหะส่วนน้อยจะอยู่บริเวณรอยต่อ (Layer) ขณะสวิตช์นำกระแส ดังนั้นอุปกรณ์เหล่านี้จะมีแรงดันเบรกดาวน์ค่อนข้างสูง อย่างไรก็ตามความเร็วในการสวิตชิ่งจะช้ากว่าอุปกรณ์สวิตชิ่งที่มีพาหะส่วนมาก

ไดโอดกำลัง

Bipolar (P-N) diode

- General Purpose or Line Frequency diode
- Fast and Ultra-fast diode
- Schottky (barrier) diode

ไดโอดสำหรับคอนเวอร์เตอร์ความถี่ต่ำกำลังสูง

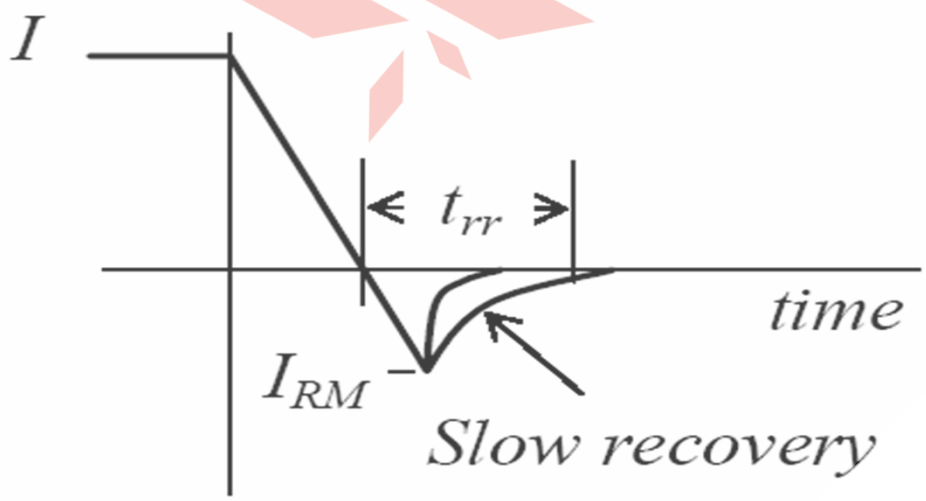
ไดโอดสำหรับคอนเวอร์เตอร์ความถี่สูงกำลังสูง

คุณสมบัติของไดโอด

<u>คุณ</u>สมบัติการฟื้นคืนตัว (Recovery diodes)

ไดโอดแบบฟื้นคืนตัวเร็ว (Fast Recovery Diodes)

ไดโอดแบบฟื้นคืนตัวแบบนุ่มนวล (Soft Recovery diodes)



ไดโอดแบบฟื้นคืนตัวเร็ว (Fast Recovery Diodes)

- ไดโอดชนิดนี้จะมีค่าเวลาในการกลับคืนตัวต่ำ ปกติจะน้อยกว่า 5us จึงถูกนำไปใช้ในวงจรชอปเปอร์ และ อินเวอร์เตอร์
- สามารถใช้กับกระแสไฟฟ้าได้ตั้งแต่น้อยกว่า 1 แอมแปร์ จนถึง 100 แอมแปร์และใช้กับแรงดันไฟฟ้าได้ตั้งแต่ 50 โวลต์ จนถึง 3 กิโลโวลต์

KMITL MASTER CLASS

ตัวอย่างของไดโอด

การคำนวณค่าคุณสมบัติของไดโอด

Reverse recovery time

$$t_{rr} = t_a + t_b$$

Peak reverse current

$$I_{RR} = t_a \frac{di}{dt}$$

$$Q_{RR} \cong \frac{1}{2} I_{RR} t_a + \frac{1}{2} I_{RR} t_b = \frac{1}{2} I_{RR} t_{rr}$$

$$I_{RR} \cong \frac{2Q_{RR}}{t_{rr}}$$

$$\therefore \quad t_{rr} t_a = \frac{2Q_{RR}}{di/dt}$$

KMITL MASTER CLASS

การคำนวณคุณสมบัติของไดโอด

Reverse Softness Factor

$$RSF = \frac{t_b}{t_a}$$

$$t_{rr} \cong \sqrt{\frac{2Q_{RR}(1+RSF)}{di/dt}} \qquad I_{RR} = \sqrt{\frac{2Q_{RR}\dfrac{di}{dt}}{1+RSF}}$$

KMITL MASTER CLASS

ตัวอย่างการคำนวณของไดโอด

- The reverse recovery time of a diode is t_{rr} = 3us (t_b=2 us, t_a =1 us) and the rate of fall of the diode current is di/dt= 30 A/us. Determine (a) the storage charge Q_{RR}, and (b) the peak reverse current I_{RR}.

คำนวณคุณสมบัติของไดโอด

- Solution t_{rr} = 3 us and di/dt =30 A/us

(a)

$$Q_{RR} = \frac{1}{2}\frac{di}{dt}t_{rr}^2\frac{1}{1+RSF}$$

$$Q_{RR} = \frac{1}{2}\text{x}\,30\frac{A}{\mu s}\text{x}\frac{(3x10^{-6})^2}{1+2} = 45\ \mu C$$

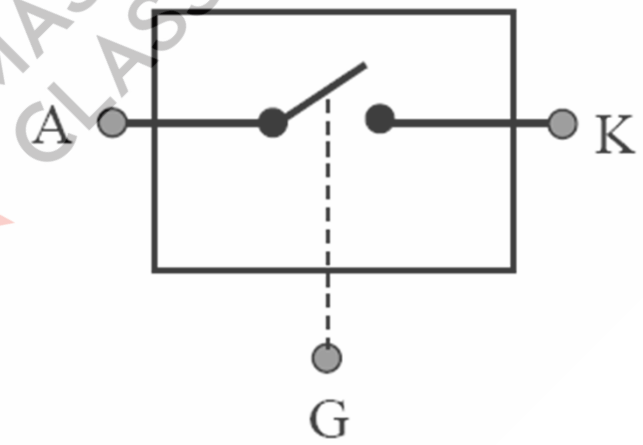
(b)

$$I_{RR} = \sqrt{\frac{2Q_{RR}\dfrac{di}{dt}}{1+RSF}} = \sqrt{\frac{2\text{ x }45\text{ x }10^{-6}\text{ x }30\text{ x }10^{6}}{1+2}} = 30\ A$$

KMITL MASTER CLASS

Switches

- Thyristor- SCR
- BJT
- MOSFET
- GTO
- IGBT
- MCT



KMITL MASTER GLASS

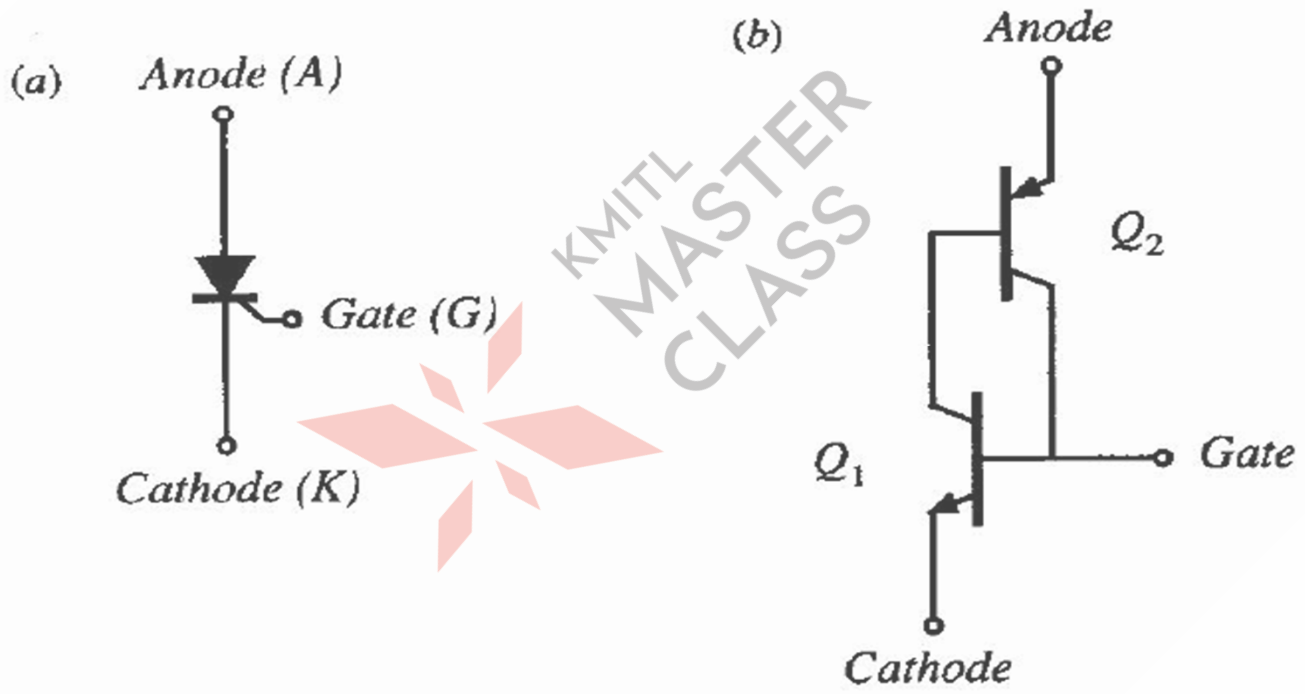
SCR (Silicon Controlled Rectifier)

1. Phase control
2. Inverter grade

KMC MASTER CLASS

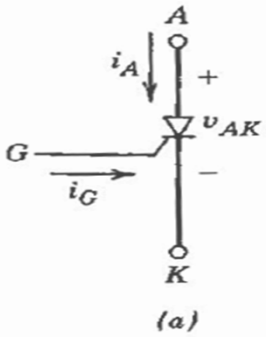
เอสซีอาร์ หรือ ซิลิกอน (Silecon Control Rectifier : SCR) เป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่อยู่ในตระกูลไธริสเตอร์(Thyristor) ที่นิยมใช้กันมากที่สุด ทำหน้าที่เป็นสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ที่ยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้ในทิศทางเดียว มีขนาดเล็กน้ำหนักเบาการทำงานมีความไว้วางใจได้สูงเมื่อใช้ระบบป้องกันที่เหมาะสมและไม่ต้องมีการบำรุงรักษา เสียค่าใช้จ่ายต่อแอมแปร์ต่ำ SCR เป็นสวิตช์ที่มีค่าความต้านทานสูงแม้ในขณะไบอัสแบบฟอร์เวิร์ดจนกว่าจะมีสัญญาณจุดชนวนที่เหมาะสมป้อนให้ขาควบคุมคือขาเกตก็จะเริ่มนำกระแสได้และค้างสภาวะการทำงานต่อไปโดยลำพัง

SCR

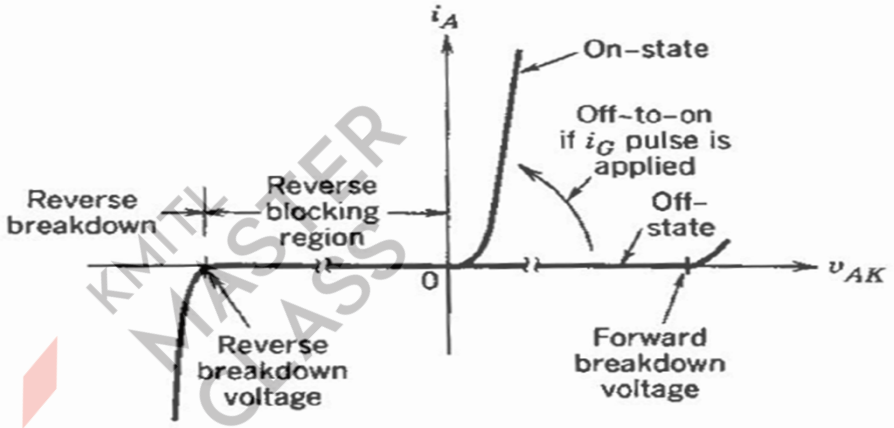


KMITL MASTER CLASS

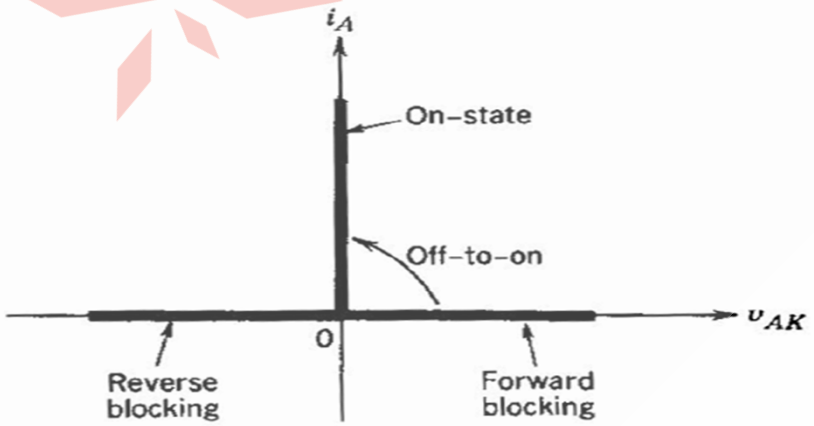
SCR


A
i_A
+
v_{AK}
G
i_G
–
K

(a)


i_A
On–state
Off–to–on
if i_G pulse is
applied
Reverse
breakdown
Reverse
blocking
region
Off–
state
0
v_{AK}
Reverse
breakdown
voltage
Forward
breakdown
voltage

(b)

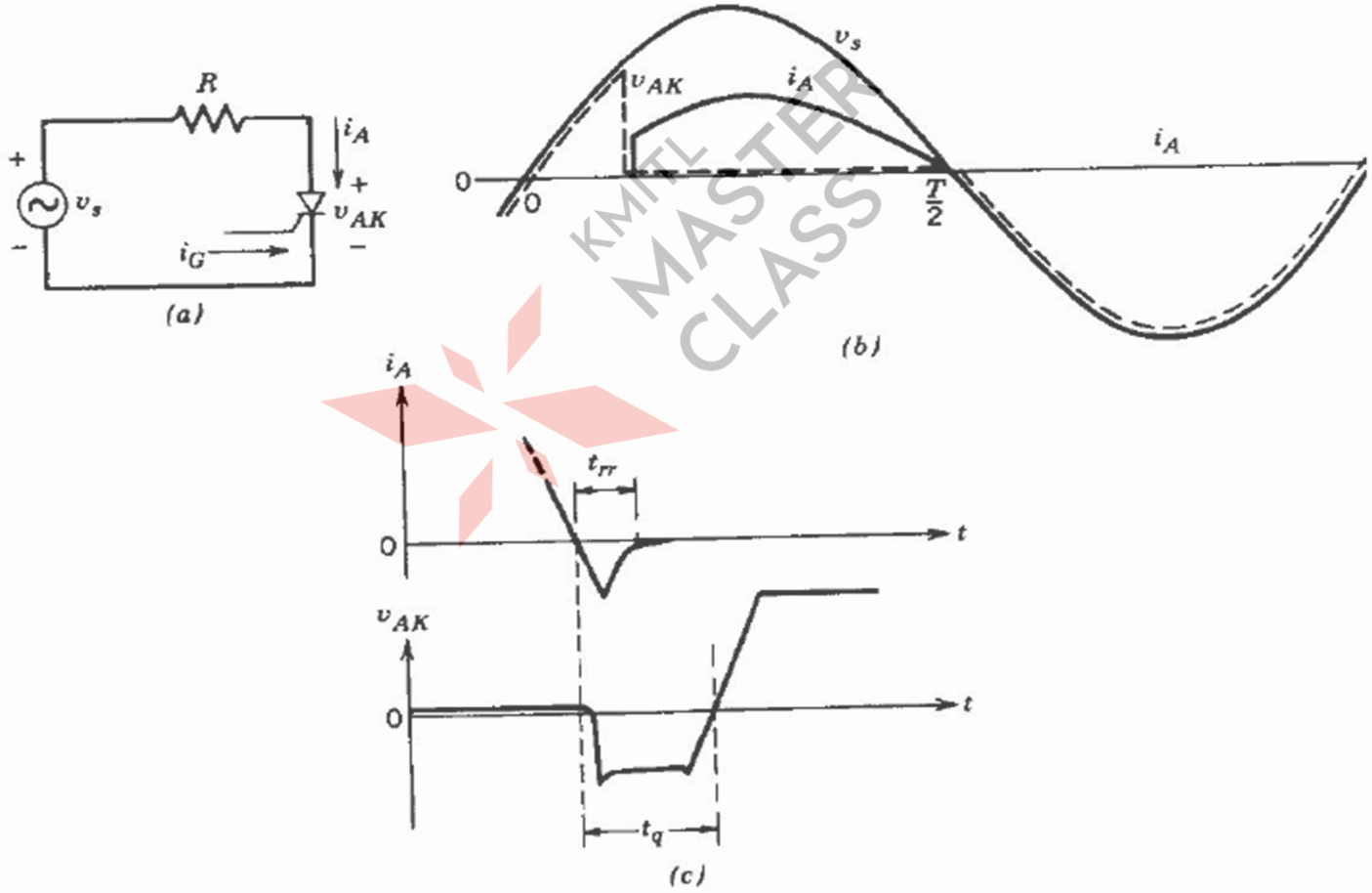

i_A
On–state
Off–to–on
0
v_{AK}
Reverse
blocking
Forward
blocking

(c)

SCR

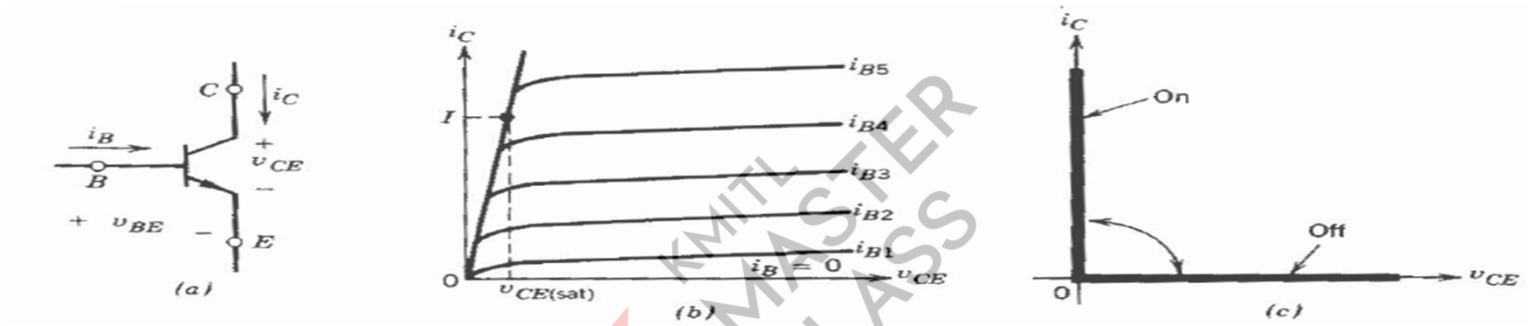
- คุณสมบัติ
- V_{sat} = 1-2 volts (ข้อมูลให้ดูจาก datasheet)
- จุดชนวน (triggerd or fired) ด้วยพัลส์เกตประมาณ 2-3 mA (ข้อมูลให้ดูจาก datasheet)
- ภายหลังการที่เอสซีอาร์นำกระแส พัลส์เกตจะไม่มีผลต่อการหยุดนำกระแส
- มีค่าที่จำกัดของ di/dt และ dv/dt
- เวลาการหยุดนำกระแส (tq) มีค่ามากกว่า t_{rr} มาก โดยที่ tq ≈ 2 µs-150µs (ข้อมูลให้ดูจาก datasheet)
- แรงดันเบรกดาวน์ (V_{BD}) มีค่าสูงมากจนถึง 4-5 kV (ข้อมูลให้ดูจาก datasheet)

SCR

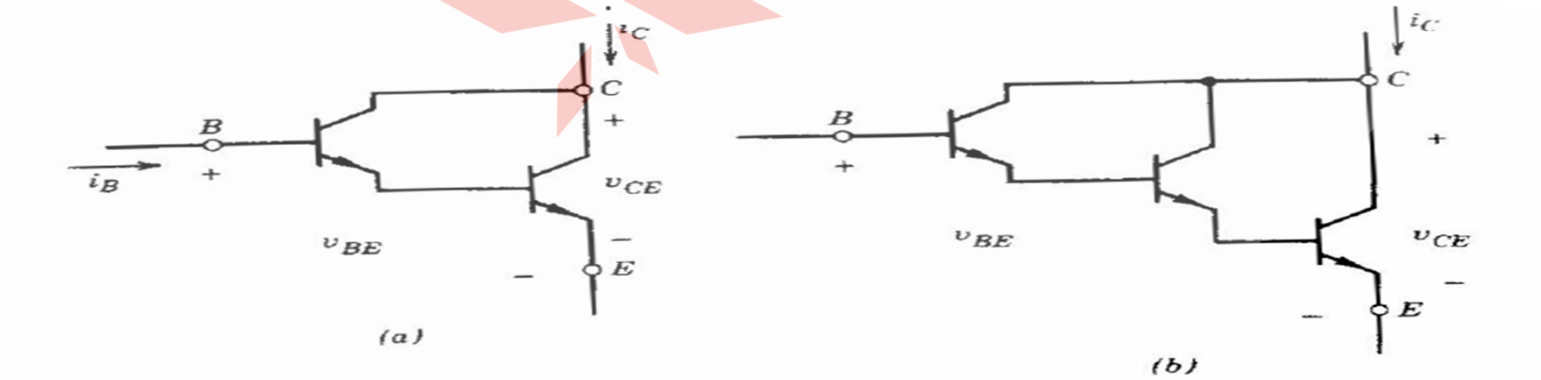


KMTL MASTER CLASS

BJT(Bipolar Junction Transistor)



BJT (a) Symbol, (b) *v-i* characteristic, (c) idealized characteristic



Darlington configurations (a) Darlington, (b) Triple Darlington

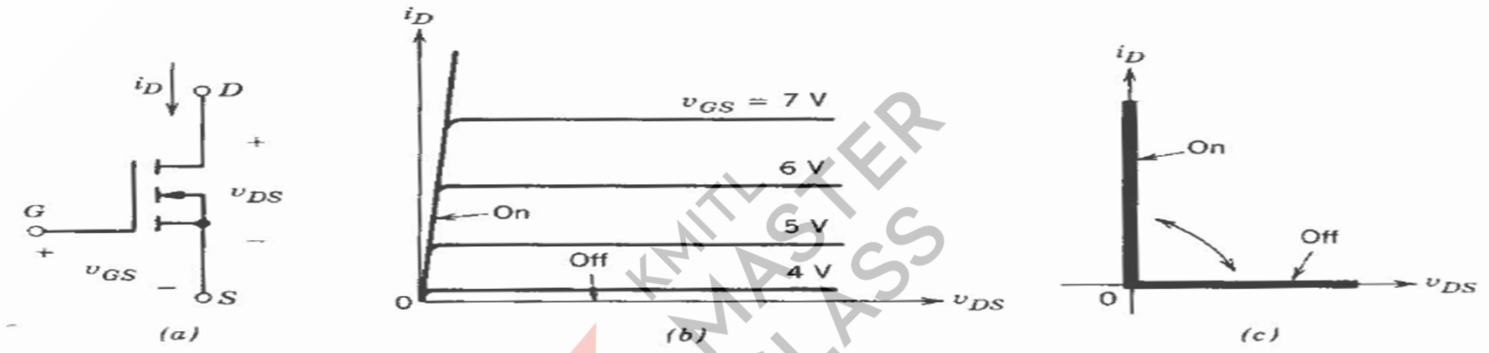
KMITL MASTER CLASS

BJT และ Darlington

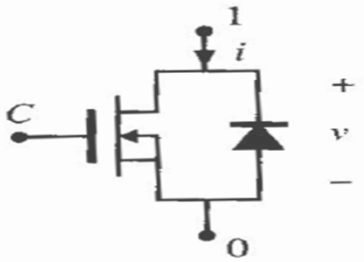
- คุณสมบัติ
- hfe < 10 สำหรับ BJT
- V_{CEsat} ≈1-2 โวลต์
- เวลาหยุดนำกระแส ประมาณ 200-300 ns ถึง 60 µsec
- แรงดันเบรกดาวน์ (V_{BD}) มีค่าจนถึง ≈ 1400 โวลต์

KMITL MASTER CLASS

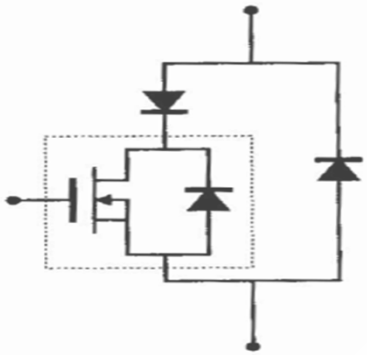
MOSFET



N-Channel MOSFET (a) Symbol, (b) *v-i* characteristic, (c) Idealised characteristic.



MOSFET with parasitic diode



MOSFET with parasitic, reverse blocking and fast recovery diodes

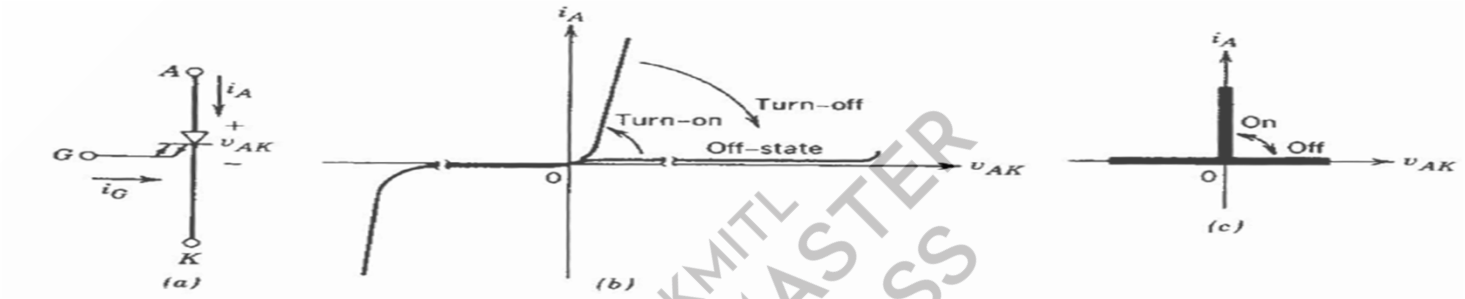
MOSFET

คุณสมบัติ

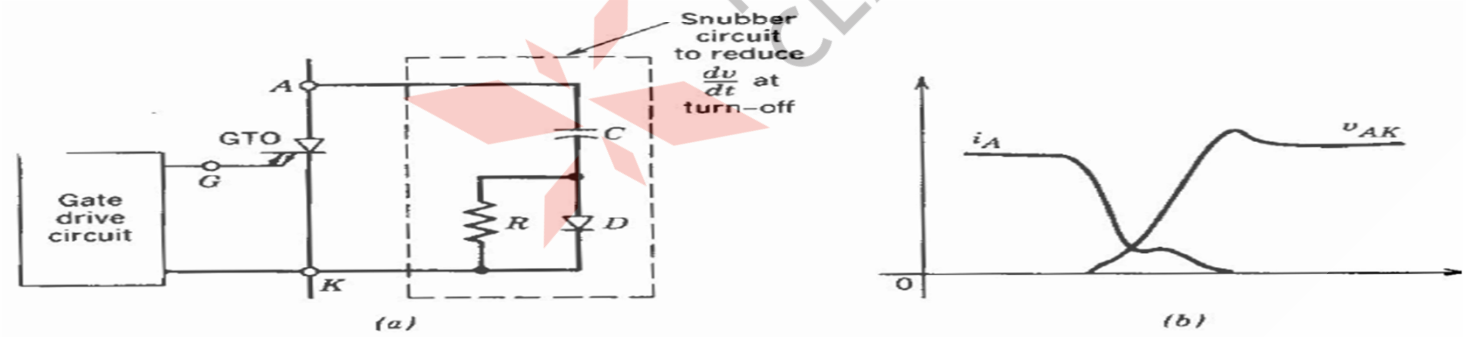
- เวลาหยุดนำกระแสเร็วมาก toff = 50 nsec-500 nsec
- ค่าความต้านทานในช่วงนำกระแส $R_{ds(on)}$ จะเพิ่มขึ้นด้วย $V_{BD}^{2.6}$ โดยทั่วไปค่า $R_{ds} \approx 40\ m\Omega$ เมื่อแรงดันทดสอบมอสเฟต 100 โวลต์ และกระแส 100 แอมป์
- แรงดันในการนำกระแสและหยุดนำกระแส $V_{GS} \approx$ 5-20 โวลต์
- มอสเฟตสามารถต่อขนานได้ง่าย

KMITL MASTER CLASS

GTO



GTO (a) Symbol, (b) *v-i* characteristic, (c) idealized characteristic



GTO (a) with snubber circuits (b) turn-off transient

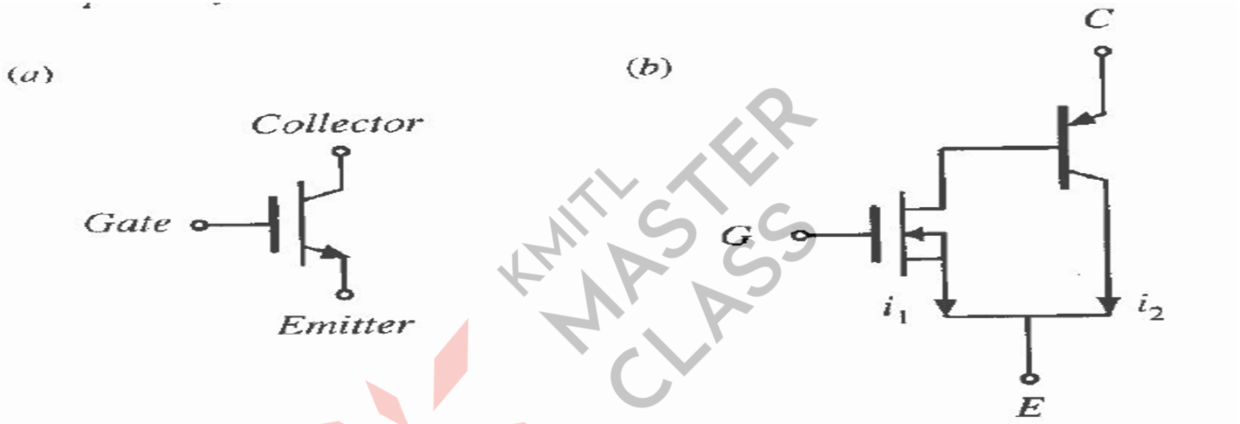
KMITL MASTER CLASS

GTO (Gate Turn-Off Thyristor)

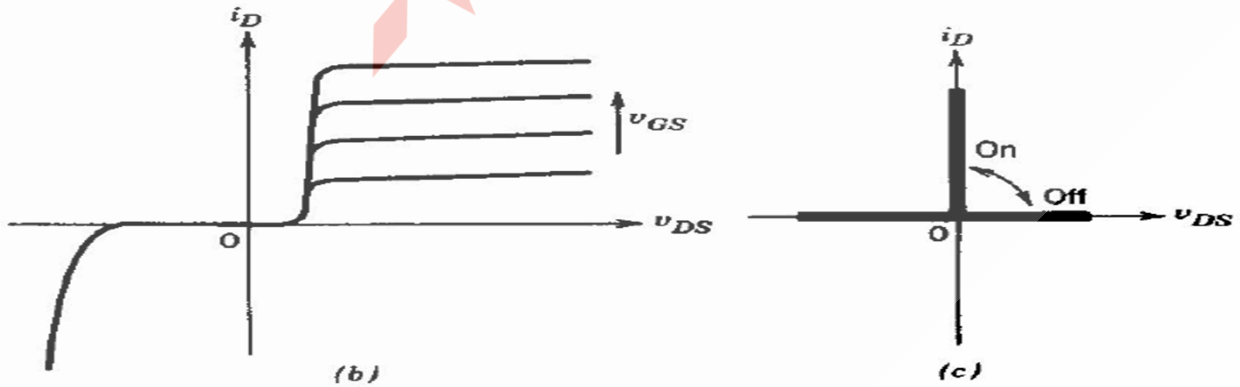
- จุดชนวนด้วยกระแสเกต และหยุดนำกระแสด้วยกระแสเกต
- แรงดันอิ่มตัว (Vsat) ≈ 2-3 V
- เวลาหยุดนำกระแส (tq) ≈ 25 µs
- แรงดันเบรกดาวน์ (V_{BD}) ≈ 4.5 kV
- ความต้องการกระแสเกตมากและอุปกรณ์สนับเบอร์เพื่อใช้หยุดนำกระแส

KMITL MASTER CLASS

IGBT



IGBT (a) Symbol, (b) equivalent circuit



KMITL MASTER CLASS

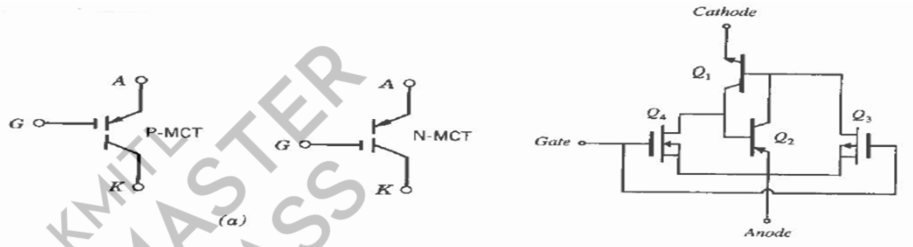
IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)

- แรงดันอิ่มตัว (Vsat) ขณะนำกระแส ≈ 2-3 V
- เวลาหยุดนำกระแส (tq) 1 us
- แรงดันเบรกดาวน์ (V_{BD}) จนถึง ≈ 2000 V

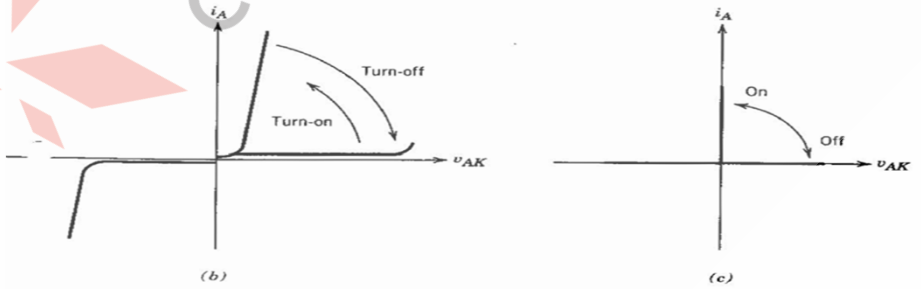
KMITL MASTER CLASS

MCT (MOS Controlled Thyristor)

- *หลักการทำงานคล้ายคลึงกับ* GTO *ยกเว้นความต้องการกระแสเกตต่ำในช่วงหยุดนำกระ* (turn-off)



MCR (a) symbol, (b) equivalent circuit



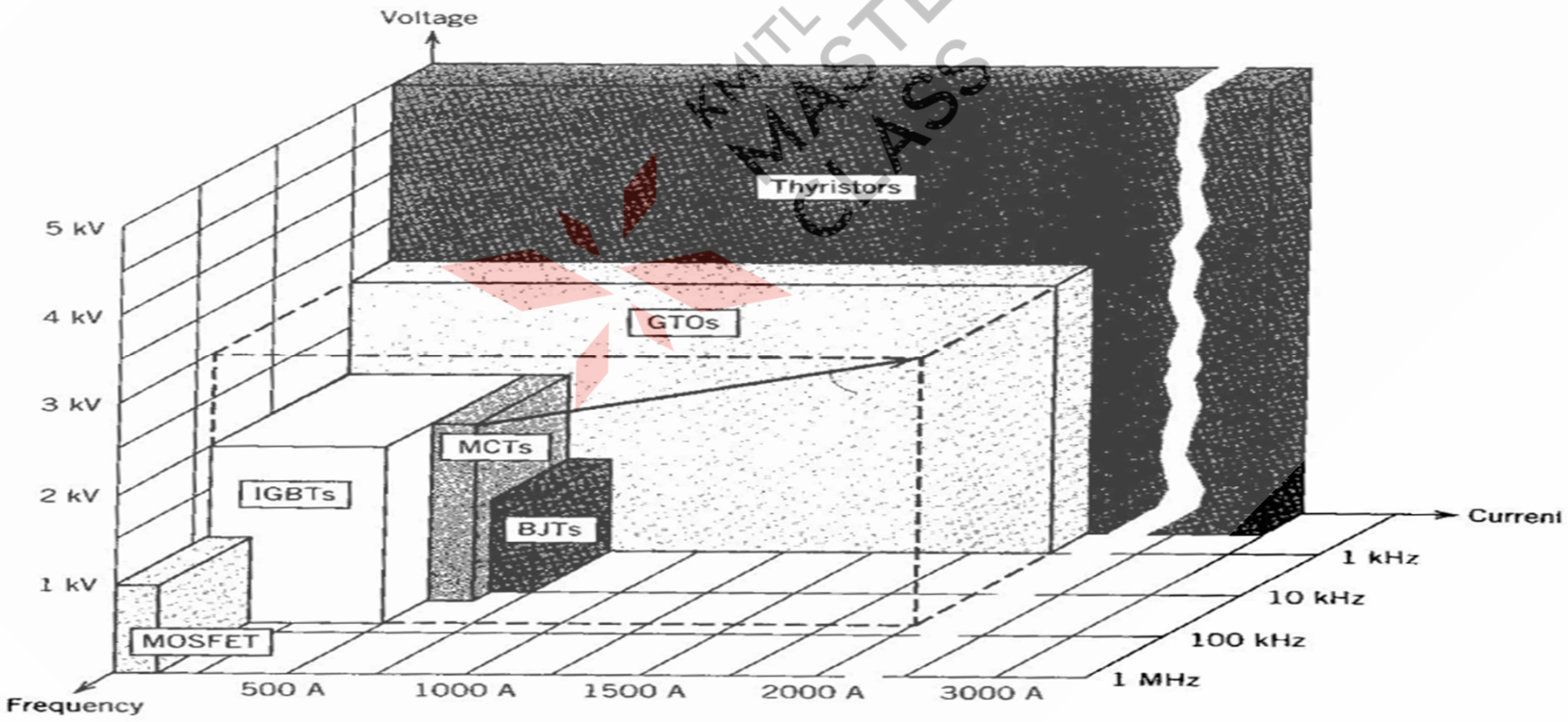
MCT (b) *v-i* characteristic, (c) idealized characteristic

KMITL MASTER CLASS

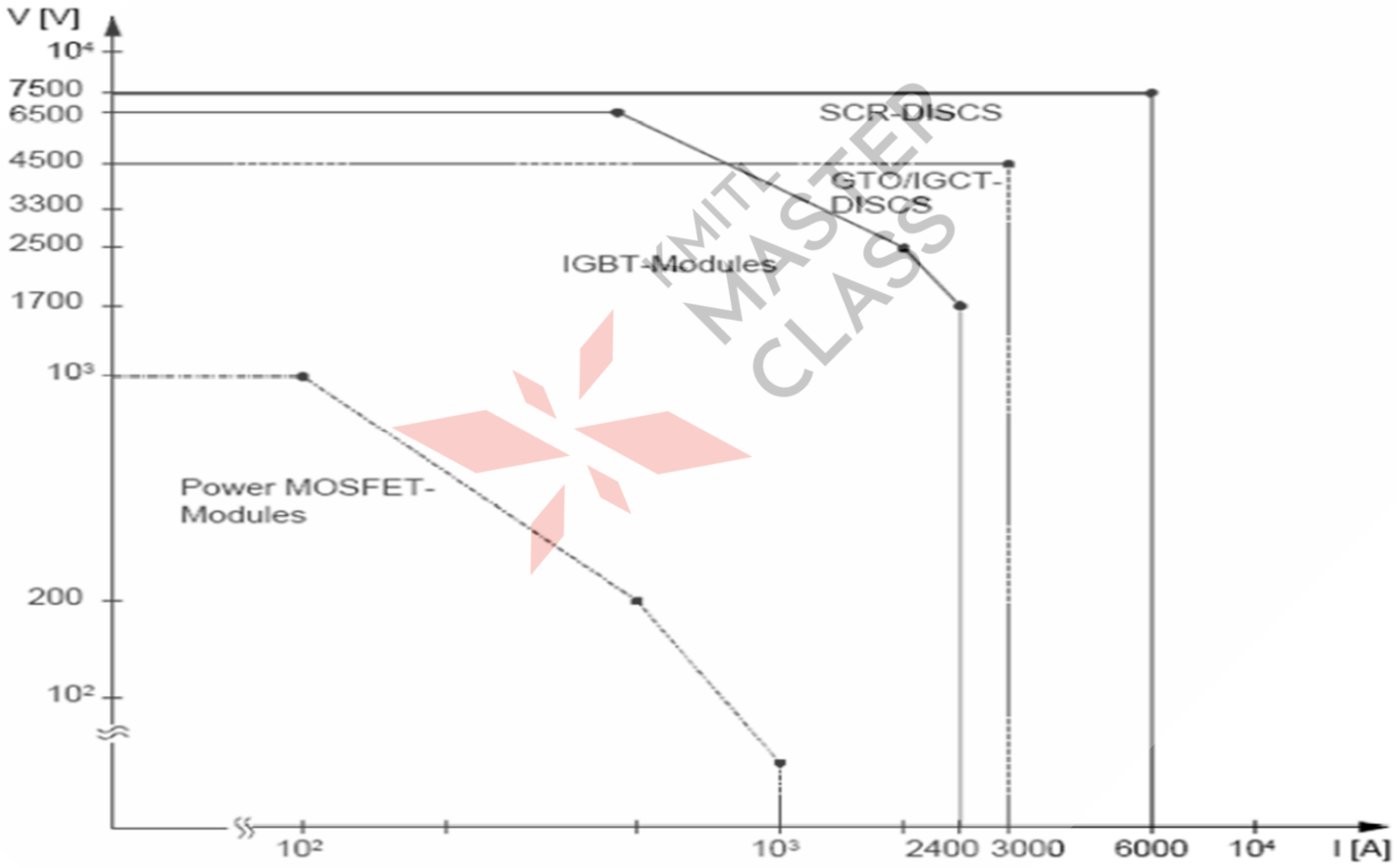
สรุปพิกัดของอุปกรณ์
(Mohan 1995)

ในปี 2002 IGBT จะมีค่ากระแสพิกัดจนถึง 2000 A และแรงดันพิกัด 3.5 kV

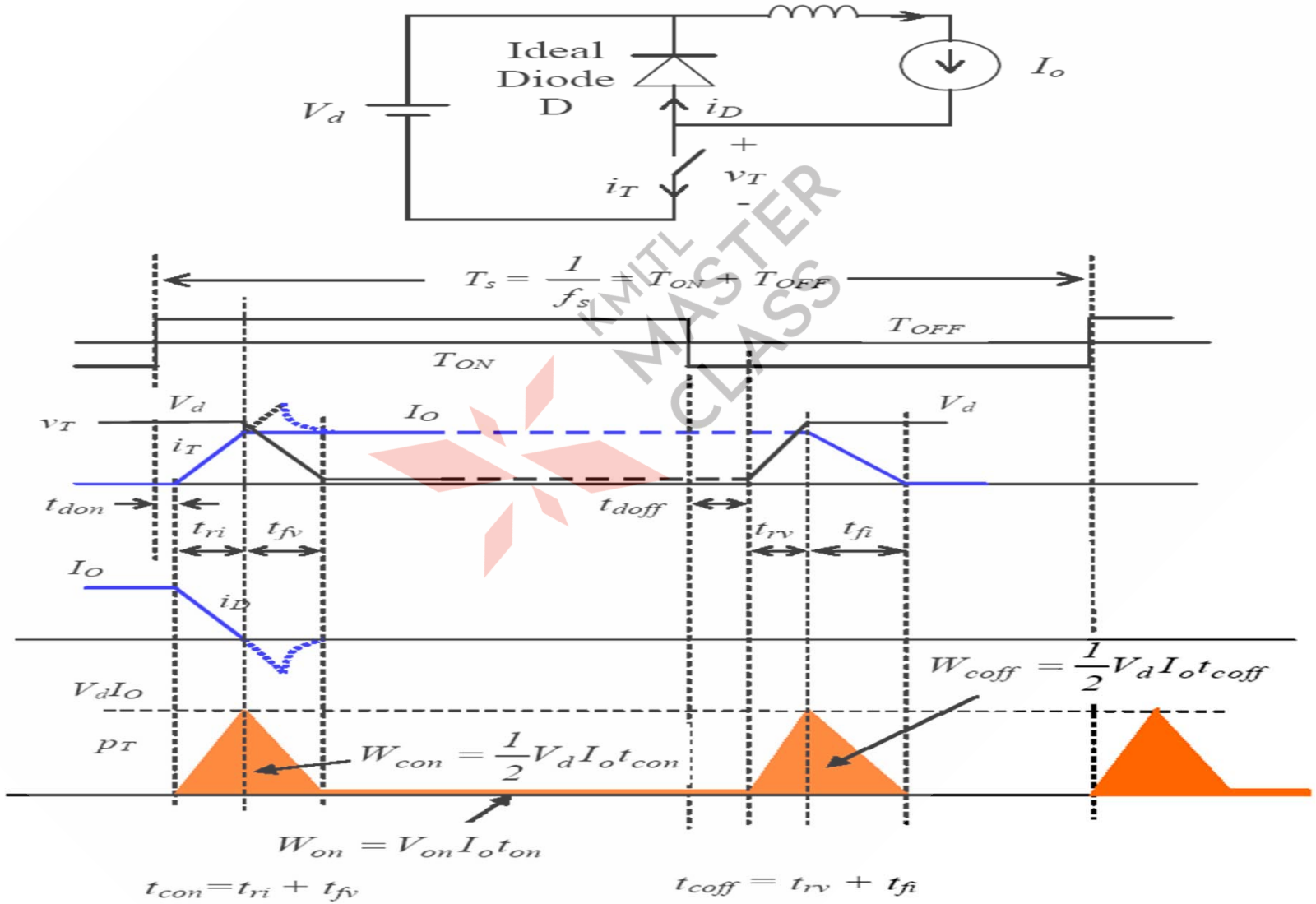
ส่วน MOSFET จะมีค่าพิกัดของแรงดันและกระแสเท่ากับ 120 V, 500 A



สรุปพิกัดของอุปกรณ์
(Semikron 2004)



ผลกระทบของอุปกรณ์สวิตชิ่ง



ผลกระทบของอุปกรณ์สวิตช์ง่าย

- สมมติไดโอดอุดมคติ และไม่มีกระแสย้อนกลับ ตลอดเวลา
- เมื่อสวิตช์ T นำกระแส ไดโอดจะถูกรีเวิร์สไบอัส ทำให้กระแส i_T มีค่าสูงจนถึง i_o หลังจากนั้นเมื่อสวิตช์หยุดนำกระแส ไดโอดจะยังไม่นำกระแส จนกว่าแรงดัน v_T จะสูงจนถึง V_d แล้วสวิตช์จะนำกระแส

ผลกระทบของอุปกรณ์สวิตชิ่ง

- ระหว่างการเปลี่ยนสภาวะ T กำลังงานสูญเสียในสวิตช์จะหาได้จาก

$$p = v_T i_T$$

ดังนั้น $$p = V_d \frac{I_o}{t_{ri}} t$$ สำหรับ $$t_{don} \le t \le t_{ri}$$

$$= I_o \frac{V_d - V_{on}}{t_{fv}} \left(t - t_{don} - t_{ri}\right)$$

$$\approx V_{on} I_o t_{on}$$ สำหรับ $$\left(t_{don} + t_{con}\right) \le t \le \left(t_{on} + t_{doff}\right)$$

KMITL MASTER CLASS

ผลกระทบของอุปกรณ์สวิตชิ่ง

- ถ้าอุปกรณ์สวิตชิ่งมีการนำกระแส และหยุดนำกระแสในสภาวะชั่วครู่ (transient)ซึ่งเวลาไม่ได้น้อยไปกว่าคาบเวลา Ts ทำให้กำลังงานสูญเสียในตัวสวิตชิ่ง Ps อาจจะมากเมื่อเปรียบเทียบกับกำลังงานสูญเสียในสภาวะอยู่ตัว (steady)

$$P_s = \frac{1}{2} V_d I_o f_s \left(t_{con} + t_{coff} \right) \text{ และ } \quad P_{on} = V_{on} I_o \frac{t_{on}}{T_s}$$