

Vermogenselektronica II

Peter van Duijsen

2 mei 2016

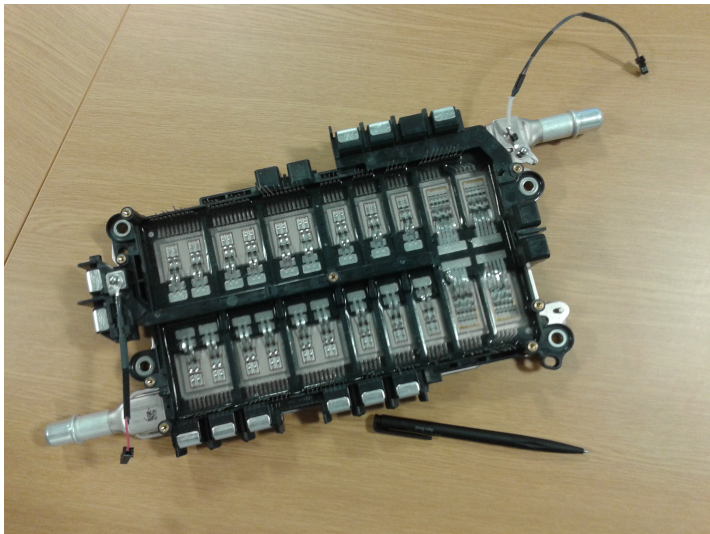
Table of contents

- 1 Inleiding
- 2 Opbouw
- 3 Mosfet
- 4 Maximale breakdown spanning
- 5 Gate Charge
- 6 Doorlaatweerstand
- 7 Bode diode Reverse Recovery
- 8 Package
- 9 IGBT
- 10 Schakelverliezen
- 11 Voorbeeld IGBT 1
- 12 Voorbeeld IGBT 2
- 13 Voorbeeld IGBT 3
- 14 Voorbeeld IGBT 4
- 15 IGBT Traction
- 16 Example IGBT Losses
- 17 Voorbeeld IGBT 4500V, 1200A

Opbouw van een inverter?

Van Mosfet tot Circuit.

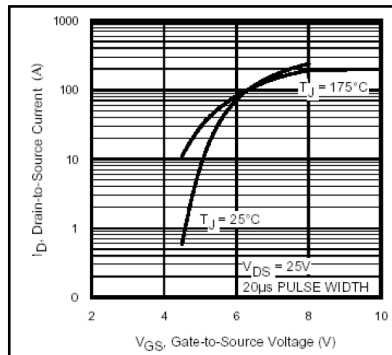
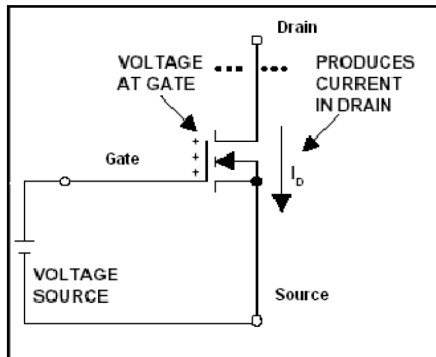
IGBT Inverter



Overzicht

- 1 Mosfet
- 2 IGBT
- 3 Schakelverliezen
- 4 Driver
- 5 Snubber

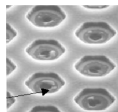
Mosfet



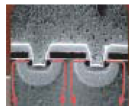
Figuur: Left: Mosfet and maximum current I_{DS} as function of the gate-source voltage V_{GS}

Halfgeleidertechnologiën

Hexagonal Cell Technology



Planar Stripe Technology

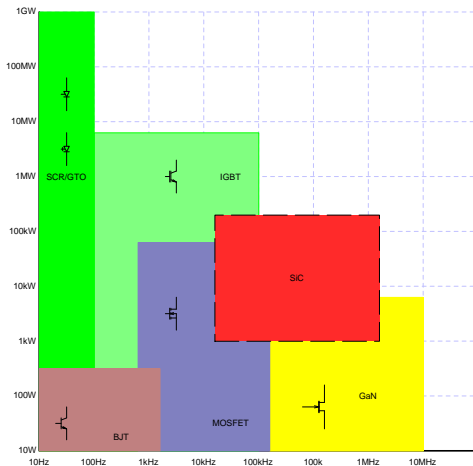


Trench Technology



Figuur: Verschillende technologiën om Mosfets te maken, waarbij de Trench Technology de verliezen en hoogste schakeltijden mogelijk maakt.

Vermogen en maximale schakelfrequentie



Figuur: Vermogensbereik en schakelfrequentie limieten voor halfgeleiders

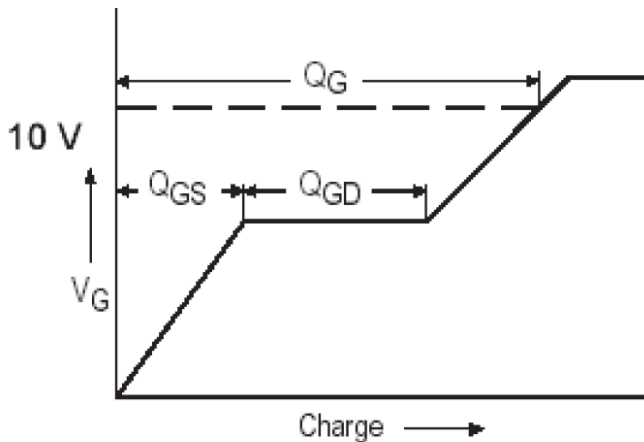
Parameters

Er zijn een aantal key-parameters die Mosfet beschrijven.

- Maximale spanning BV_{DSS}
- Gate Charge Q_g
- Doorlaatweerstand $R_{ds(on)}$
- Bode diode Reverse Recovery Q_{rr} , t_{rr} en I_{rr}
- Package

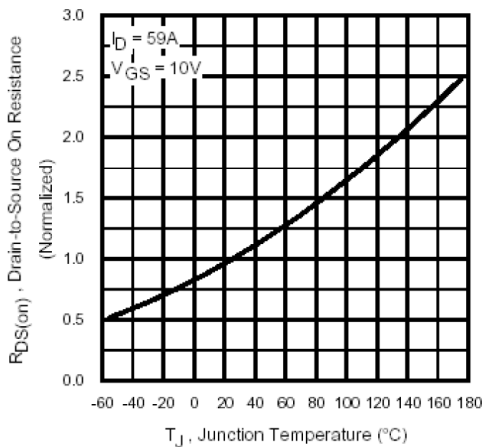
- De maximale spanning die een Mosfet kan blokkeren wordt met de maximale Breakdown Voltage BV_{DSS} aangegeven.
- Des te groter BV_{DSS} , des te groter wordt de doorlaatweerstand $R_{DS(on)}$.
- Kies BV_{DSS} 50% hoger dan de DC link spanning.

Gate Charge



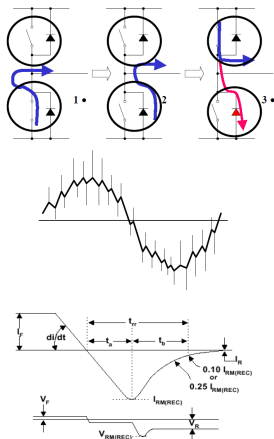
Figuur: Toename van de gate charge naarmate de gatespanning toeneemt.

Doorlaatweerstand



Figuur: Genormaliseerde doorlaatweerstand $R_{ds(on)}$ als functie van de temperatuur

Reverse Recovery



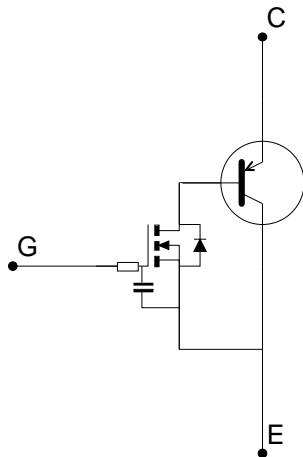
Figuur: Parameters die de reverse recovery van een diode beschrijven.

Package



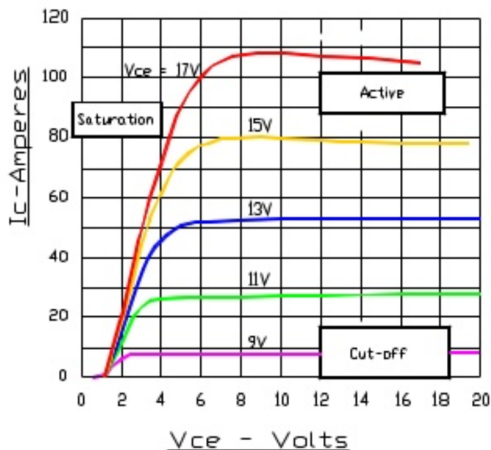
Figuur: Verschillende uitvoeringen van behuizingen voor Mosfet's, de middelste is de Direct-Mosfet.

IGBT Darlington



Figuur: IGBT als darlingtonschakeling van een Mosfet met bipolaire transistor.

Doorlaatkarakteristiek

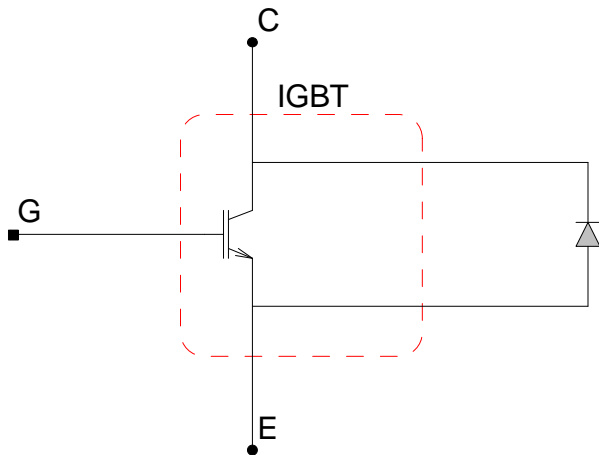


Figuur: Doorlaatkarakteristiek $I_{ce} - V_{ce}$ van de IGBT voor toenemende Gate-Emitter spanning.

Bipolaire component

Omdat het een bipolaire component is moeten er altijd vrijloop dioden parallel aan de IGBT geplaatst worden, om de vrijloop stroom te laten lopen.

Vrijloop diode



Figuur: Bij de IGBT moet altijd een externe vrijloop diode geplaatst worden.

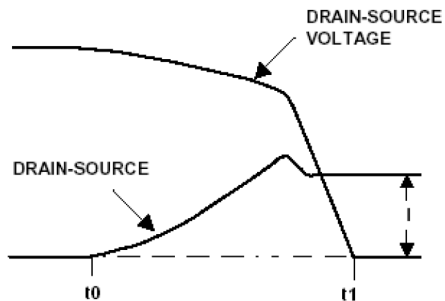
De IGBT kan een veel hogere spanning blokkeren dan de Mosfet en wordt daarom toegepast in de hogere vermogensklasse.

Maximaal vermogen

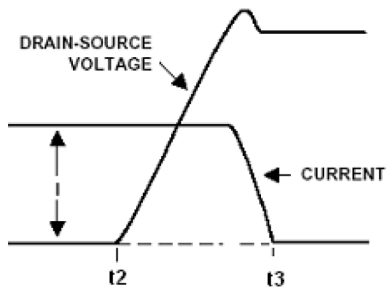
De schakelverliezen spelen een belangrijke rol met betrekking tot het maximale vermogen dat de inverter kan verwerken.

Schakelen

Als de Mosfet uitgeschakeld wordt, dan zal eerst de drain-source spanning V_{DS} toenemen, voordat de drain-source stroom I_{DS} afneemt.



MOSFET Turn-On



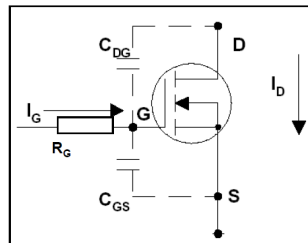
MOSFET Turn-Off

Figuur: Schakelen Mosfet

Rg en Qg

$\uparrow R_g \Rightarrow \downarrow I_g \Rightarrow \uparrow t_{\text{SWITCHING}} \Rightarrow \uparrow P_{\text{SWITCHING}}$

$\uparrow Q_g \Rightarrow \uparrow t_{\text{SWITCHING}} \Rightarrow \uparrow P_{\text{SWITCHING}}$



Figuur: R_g Q_g en het verlies

Berekenen schakelverliezen

De schakelverliezen E_{SW} zijn met behulp van de golfvormen van I_{DS} en V_{DS} te berekenen.

$$E_{SW} = \int_0^T V_{DS}(t) \cdot I_{DS}(t) dt \quad (1)$$

Alleen schakelverliezen als er geschakeld wordt

$$P_{Schakelen} = ESW * F_s \quad (2)$$

Doorlaatverliezen

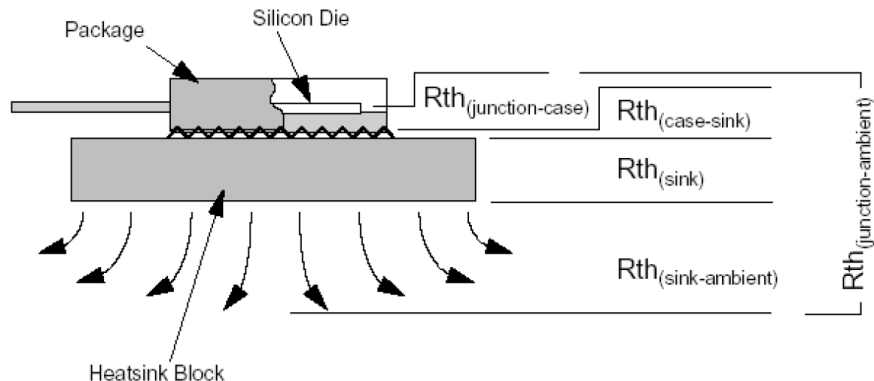
$$P_{\text{Doorlaat}} = \left(I_{DS}^{\text{RMS}} \right)^2 \cdot R_{DS(\text{on})} \quad (3)$$

Totale verliezen

$$P_{max} = P_{Schakel} + P_{Doorlaat} \quad (4)$$

Heatsink

Doorlaat weerstand is temperatuurafhankelijk



Figuur: Thermische weerstanden

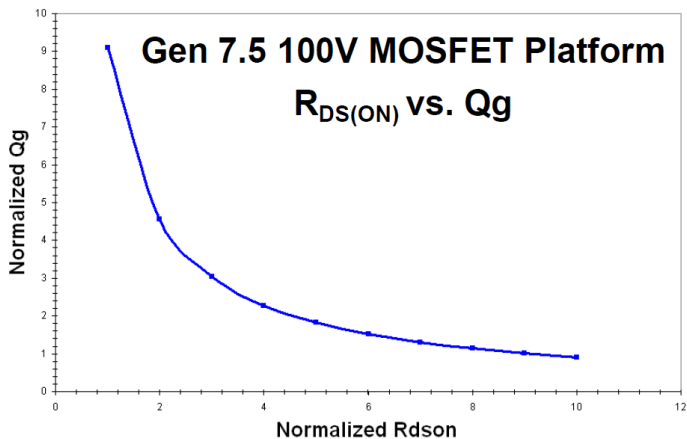
Thermische vergelijking

$$T_{Junctie} = T_{Omgeving} + P_{max} \cdot (R_{thjc} + R_{thcs} + R_{ths} + R_{thsa}) \quad (5)$$

Thermische weerstanden

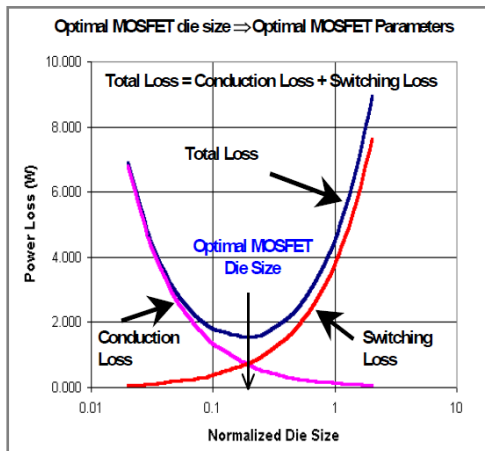
- $T_{Omgeving}$ = Omgevingstemperatuur in deg Celsius
- $T_{Junctie}$ = Temperatuur van de halfgeleiderjunctie in deg Celsius
- R_{thjc} = Thermische warmteweerstand tussen de junctie en da behuizing(case)
- R_{thcs} = Thermische warmteweerstand tussen de behuizing(case) en het koellichaam(sink)
- R_{ths} = Thermische warmteweerstand van het koellichaam(sink)
- R_{thsa} = Thermische warmteweerstand voor de warmtegeleiding van het koellichaam naar de omgeving

Figure Of Merit FOM



Figuur: Relatie tussen de doorlaatweerstand $R_{DS(on)}$ en Q_g

Keuze Mosfet

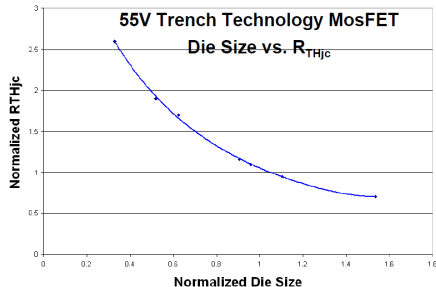
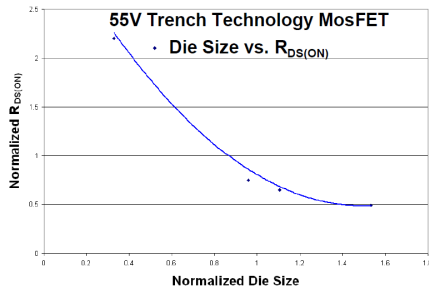


Figuur: Optimale Mosfet

Grootte van de halfgeleider en de doorlaatweerstand

- Als de halfgeleider kleiner wordt, dan zijn er meer doorlaatverliezen $P_{Doorlaat}$ en minder schakelverliezen $P_{Schakel}$.
- Als de halfgeleider groter wordt, dan zijn er meer schakelverliezen $P_{Schakel}$ en minder doorlaatverliezen $P_{Doorlaat}$.

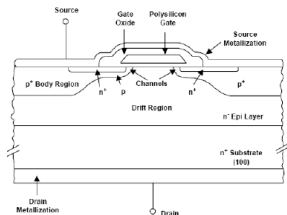
Afhankelijkheid R_{th}



Figuur:

- Een kleinere halfgeleider heeft een hogere doorlaatweerstand $R_{DS(on)}$ en een hogere warmteweerstand R_{thjc} .
- Een grotere halfgeleider heeft een lager doorlaatweerstand $R_{DS(on)}$ en een lagere warmteweerstand R_{thjc} .

FOM Mosfet



Planar MOSFET Structure

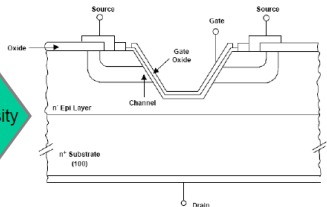
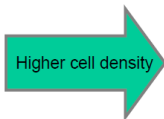
IRF540

100 V

66m ohms

50 nC

$$R_{DS(on)} \times Q_g = 3300$$



Trench MOSFET Structure

IRF6665

100 V

53m ohms

8.4 nC

$$R_{DS(on)} \times Q_g = 445$$

Figuur: Planar en Trench

R_{ds} en Q_g

$$FOM = R_{DS(on)} \cdot Q_G \quad (6)$$

Des te lager de FOM, des te lager de totale verliezen van de Mosfet zullen zijn.

Berekening Verliezen

- Schakelfrequentie van $F_s = 5\text{kHz}$
- Doorlaatspanning van de IGBT $V_{ce} = 2.4$ volt
- Duty-cycle van 50% $\Rightarrow d = 0.5$
- DC link spanning van 600 volt
- moet een stroom van 50 ampere leveren
- Inschakelverlies (Volgens de grafiek uit de datasheet bij $I_{ce} = 50$ ampere en $U_{ce}^{max} = 600$ volt), $E_{on} = 6.4$ mWs
- Uitschakelverlies (Volgens de grafiek uit de datasheet bij $I_{ce} = 50$ ampere en $U_{ce}^{max} = 600$ volt), $E_{off} = 6.2$ mWs

De verliezen per IGBT

$$P_{max} = P_{Schakel} + P_{Doorlaat} \quad (7)$$

$$= d \cdot V_{ce} \cdot I_{ce} + F_s \cdot E_{on} + F_s \cdot E_{off} \quad (8)$$

$$= 0.5 \cdot 2.4 \cdot 50 + 5000 \cdot (0.0064 + 0.0062) \quad (9)$$

$$= 60 + 63 = 123 \text{ Watt} \quad (10)$$

Totale verliesvermogen voor 6 IGBT's op $6 \cdot 123 = 738$ Watt

Rendement

- Vermogen van de inverter van $50 \cdot 600 = 30$ kilowatt
- Rendement van de inverter hierdoor boven de 95% .

25 Ampere

Stroom is nu nog maar 25 ampere
Verliezen per IGBT

$$P_{max} = P_{Schakel} + P_{Doorlaat} \quad (11)$$

$$= d \cdot V_{ce} \cdot I_{ce} + F_s \cdot \frac{I_{ce}}{I_{ce}^{max}} E_{on} + F_s \cdot \frac{I_{ce}}{I_{ce}^{max}} E_{off} \quad (12)$$

$$= 0.5 \cdot 2.4 \cdot 25 + 5000 \cdot \left(\frac{25}{50} 0.0064 + \frac{25}{50} 0.0062 \right) \quad (13)$$

$$= 30 + 31.5 = 62.5 \text{ Watt} \quad (14)$$

Een halvering dus van de verliezen.

Hogere Schakelfrequentie

Schakelfrequentie verdubbeld.

De verliezen per IGBT worden dan

$$P_{max} = P_{Schakel} + P_{Doorlaat} \quad (15)$$

$$= d \cdot V_{ce} \cdot I_{ce} + F_s \cdot E_{on} + F_s \cdot E_{off} \quad (16)$$

$$= 0.5 \cdot 2.4 \cdot 50 + 10000 \cdot (0.0064 + 0.0062) \quad (17)$$

$$= 60 + 126 = 186\text{Watt} \quad (18)$$

Een verdubbeling van de schakelverliezen, terwijl de doorlaatverliezen gelijk blijven.

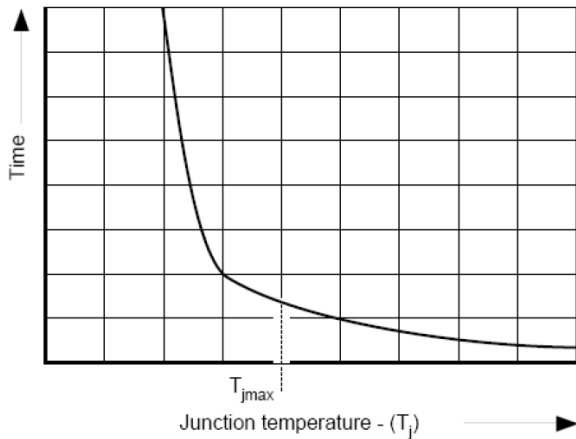
Temperatuur

Willen we dat de IGBT's in de inverter niet warmer worden dan 125 deg Celsius, dan kan de maximale warmte weerstand R_{thJA} bij een omgevingstemperatuur van 25 deg Celsius, berekend worden op

$$R_{thJA} = \frac{125 - 25}{123} = 813\text{mK/W} \quad (19)$$

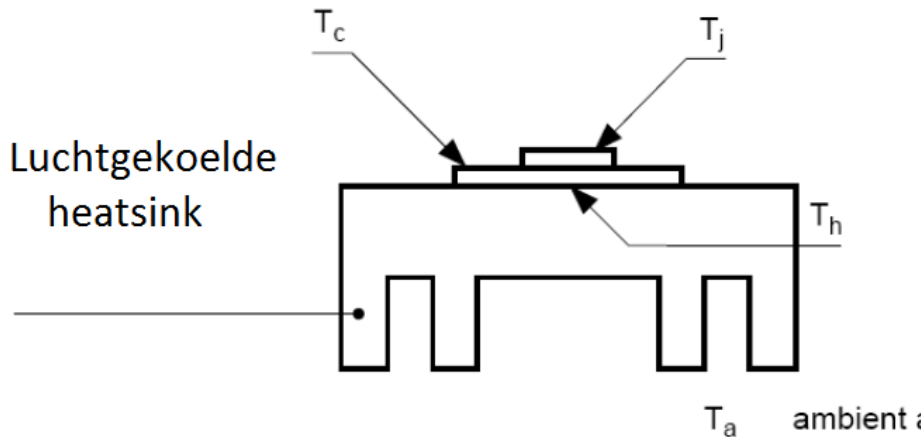
Dit is toch wel een aanzienlijke koelplaat in het geval er geen geforceerde koeling door middel van een luchtstroom van met ventilator gebruikt wordt.

IGBT Lifetime



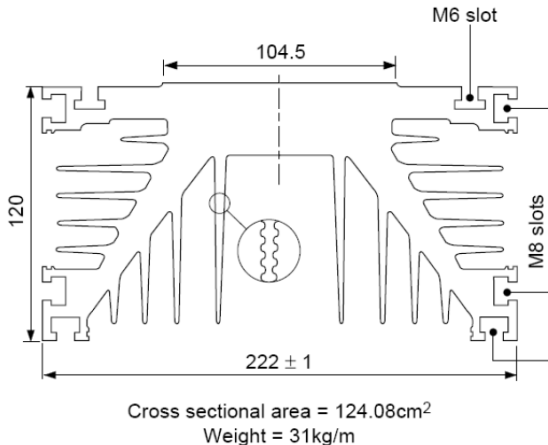
Figuur: IGBT Lifetime

IGBT Luchtgekoelde



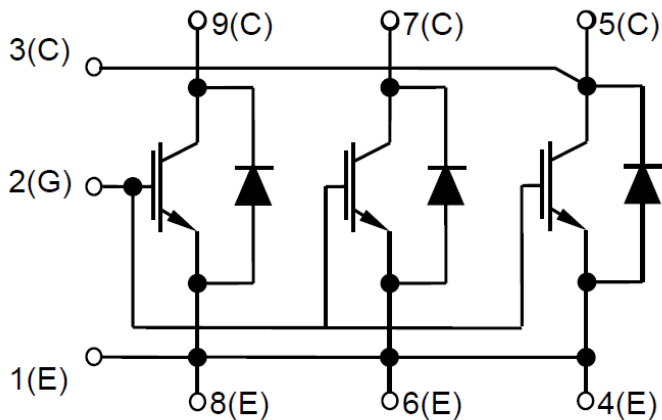
Figuur: IGBT Luchtgekoelde

IGBT Luchtgekoelde Typisch



Figuur: IGBT Luchtgekoelde Typisch

Example schema



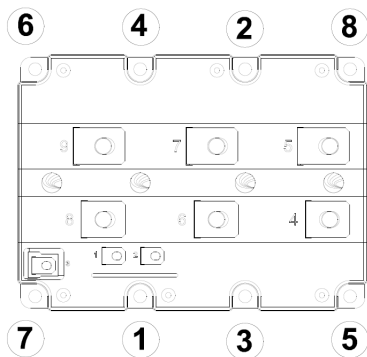
Figuur: Example schema

Example foto



Figuur: Example foto

IGBT Montagevolgorde



Tightening best Sequence: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8

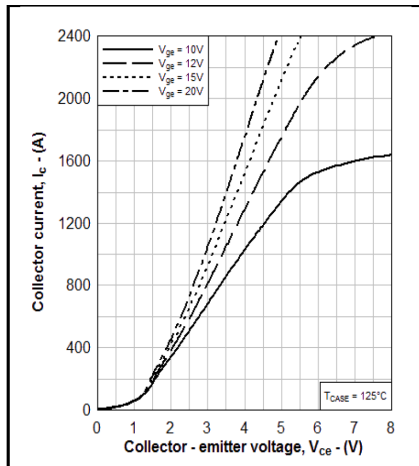
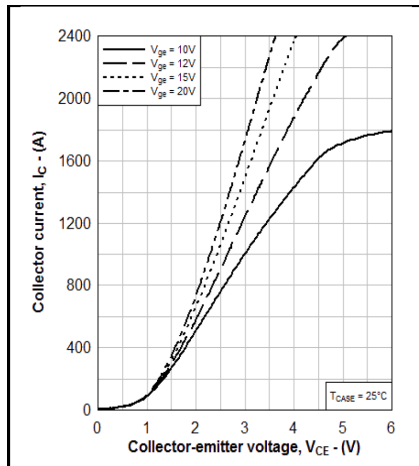
Figuur: IGBT Montagevolgorde

IGBT datasheet

Datasheet			
DIM1200ASM45-TS000			
Temp=125°C			
IGBT		DIODE	
Eon (J)	6.45	Erec (J)	3.75
Eoff (J)	4.65		
Inom (A)	1200	Inom (A)	1200
Vnom (V)	2800	Vnom (V)	2800
Vceo (V)	1.44	Vdo (V)	1.79
Ro (Ω)	0.001677	Rd (Ω)	0.001167
Rth(j-c) ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)	0.008	Rth(j-c) ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)	0.016
Rth(c-h) ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)	0.006	Rth(c-h) ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)	0.006
Rth(j-h) ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)	0.014	Rth(j-h) ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)	0.022
Rth(hs-a) ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)	0.007	Rth(hs-a) ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)	0.007

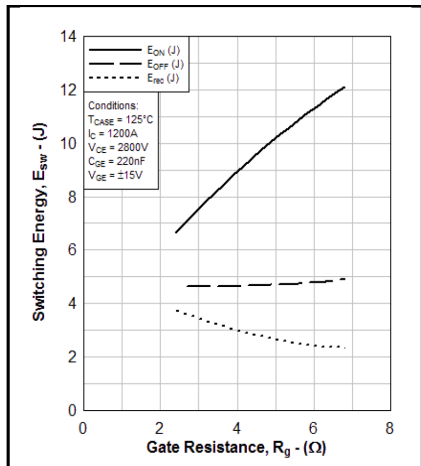
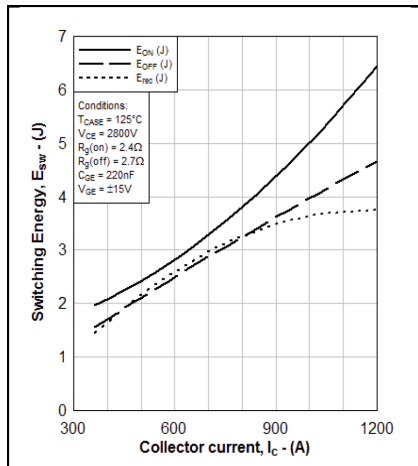
Figuur: IGBT datasheet

Example vce



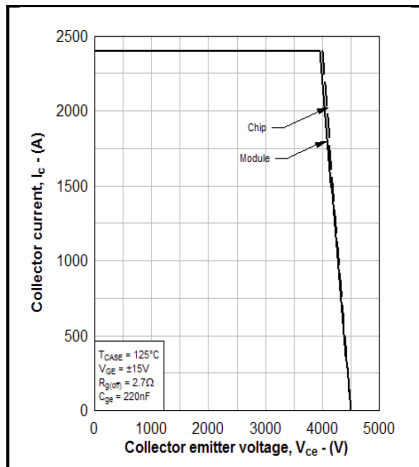
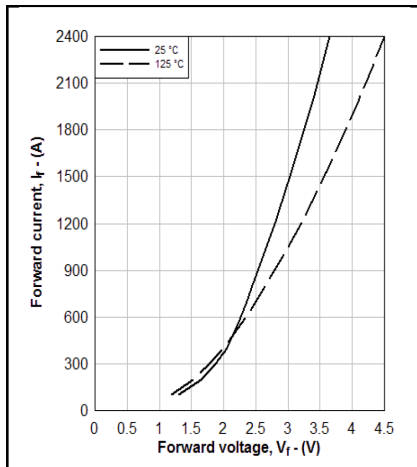
Figuur: Example vce

Example E



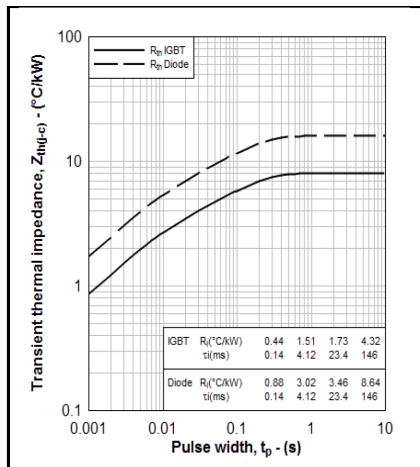
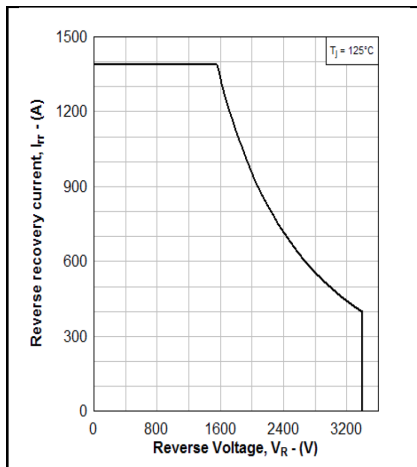
Figuur: Example E

Example Vd

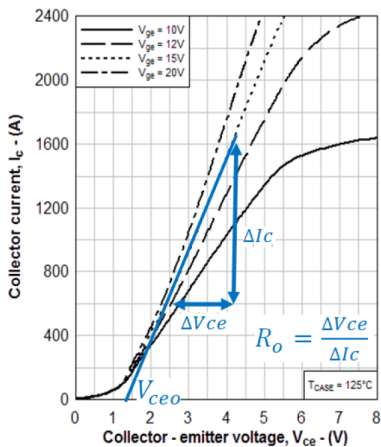


Figuur: Example Vd

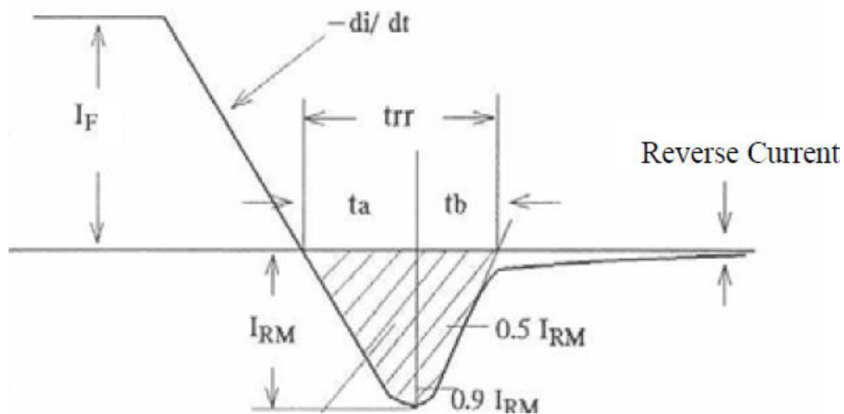
Example Rth



Figuur: Example Rth

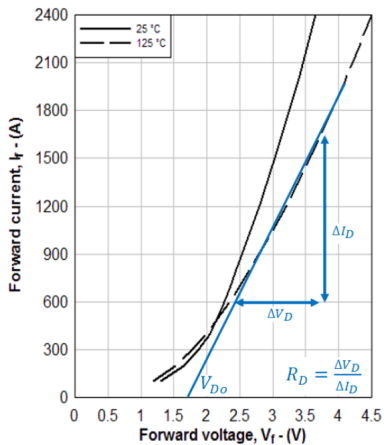
IGBT R_{ce}Figuur: IGBT R_{ce}

IGBT Revrec

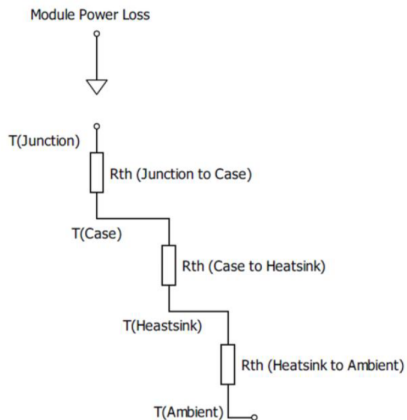


Figuur: IGBT Revrec

IGBT Rd

Figuur: IGBT R_D

IGBT R_{th}



Figuur: IGBT R_{th}

IGBT input

Input	
Vdc (V)	2800
I_{orms} (A)	800
Freq.sw (Hz)	400
PF (Cosϕ)	0.85
Modulation Index m	1
Ambient Temp °C	60

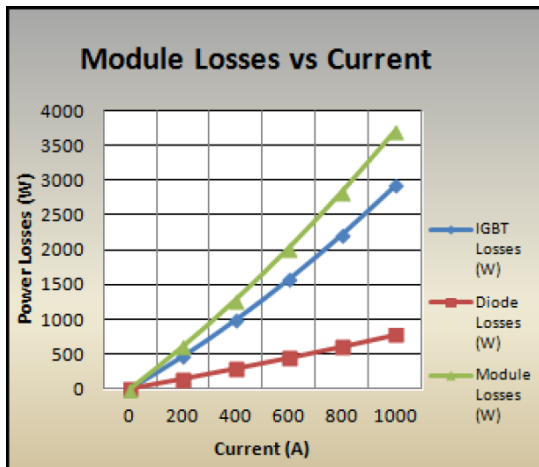
Figuur: IGBT input

IGBT output

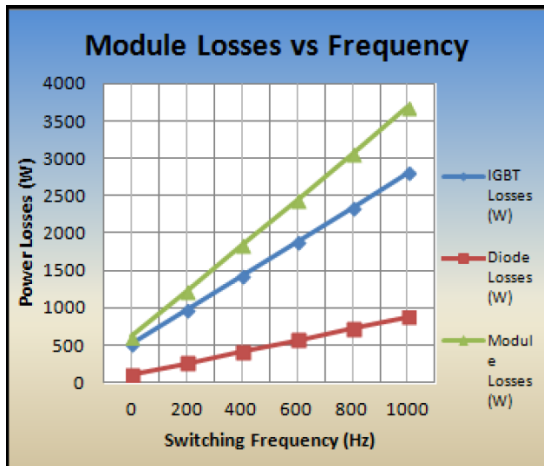
Results	IGBT	Diode
Pconduction losses (W)	894	159
Pswitching losses (W)	1332	450
Ptotal losses per device (W)	2227	609
$\Delta T(j-hs)$ ($^{\circ}C$)	31	13
Total losses per module (W)	2836	
$\Delta T(hs-a)$ ($^{\circ}C$)	20	
T_j ($^{\circ}C$)	111	93

Figuur: IGBT output

IGBT Losses current



Figuur: IGBT Losses current

IGBT Losses F_s 

Figuur: IGBT Losses F_s