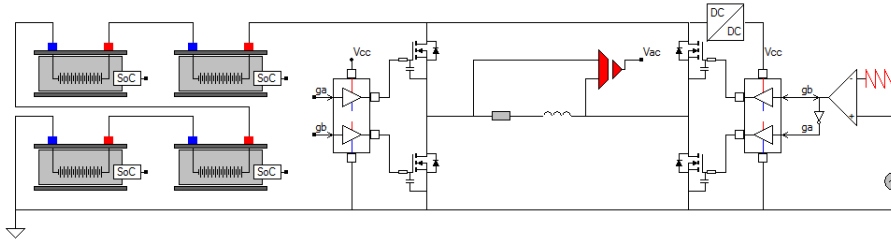


Vraag 1, (2 punten)

De waarde van de spoel L in een enkelfase belasting is niet bekend. In de onderstaande éénfase inverter wordt door de AC last een sinusvormige stroom met een RMS waarde van 2.47 Ampere gemeten.



De uitgangsfrequentie is 50Hz .

De DClink spanning is gelijk aan 48 volt

De last is een serieschakeling van een weerstand $R = 10\Omega$ en $L = (\text{uitrekenen})\text{mH}$.

De schakelfrequentie is 20kHz en de modulatie index van de bipolaire PWM is gelijk aan $m = 1$.

De doorlaatverliezen van de halfgeleiders mag je verwaarlozen.

De stroom door de R-L last heeft een rms waarde van 2.47 Ampere.

$$V_{dc} = 48\text{volt} \quad R = 10\Omega \quad I_{AC} = \hat{I} \cdot \sin(2\pi \cdot 50) \quad Fs = 20\text{kHz} \quad m = 1 \quad I_{RMS} = 2.47\text{A}$$

(a) Bereken de waarde van de spoel L ?

Antwoord:

$$V_{dc} = \hat{V} = V_{rms} \cdot \sqrt{2}$$

$$Z = \frac{V_{rms}}{I_{rms}}$$

$$Z = \sqrt{R^2 + (2\pi fL)^2}$$

$$V_{dc} = \hat{V} = 48\text{V} \quad \hat{V} = V_{rms} \cdot \sqrt{2} = 48$$

$$V_{rms} = 33.94$$

$$Z = \frac{V_{rms}}{I_{rms}} = \frac{33.94}{2.47} = 13.74$$

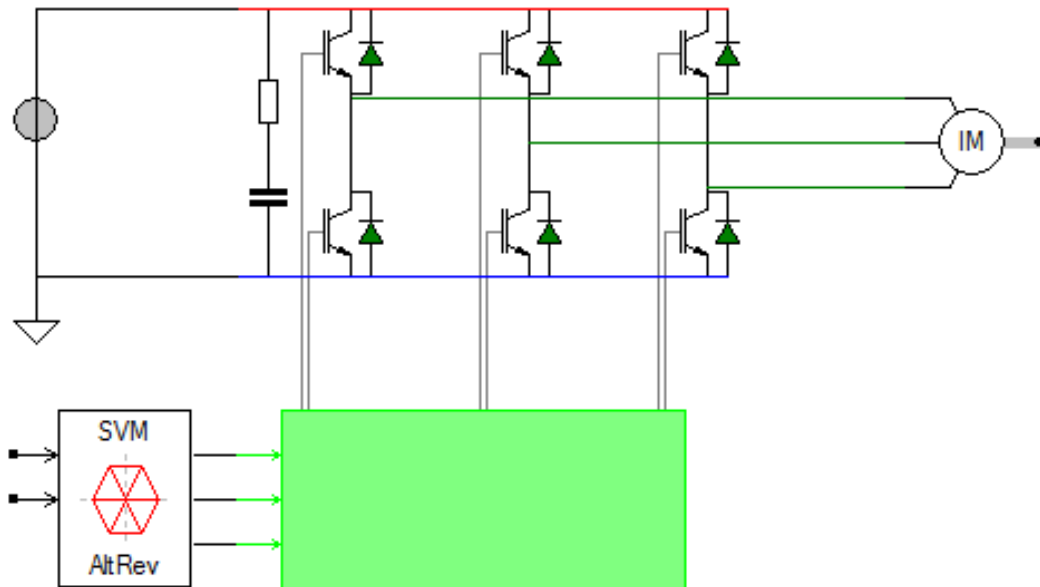
$$X = \sqrt{Z^2 - R^2} = \sqrt{13.74^2 - 10^2} = \sqrt{188.81 - 100} = \sqrt{88.81} = 9.4$$

$$L = X_L / 2\pi f = 9.4 / 314.159 = 30\text{mH}$$

Vraag 2, (2 punten)

Gegeven is een driefasen mosfet inverter. Zowel de Mosfet als de antiparallele diode hebben een doorlaatweerstand van $R_{ds} = 100m\Omega$ en $R_d = 100m\Omega$

Door de R-L belasting wordt een sinusvormige stroom gemeten met een amplitude waarvan de stroom in amplitude door een regeling wordt ingesteld. De stroom is afhankelijk van de vraag en is dus niet constant. De spanning over de inverter komt uit een batterij en kan bij ontlading dalen van 50 volt naar 40 volt.



- (a) In de halfgeleider treden twee verliezen op, doorlaat en schakelverlies. Noem tenminste twee grootheden waar deze verliezen van afhankelijk zijn en beschrijf hoe de verliezen hiervan afhankelijk zijn

Antwoord:

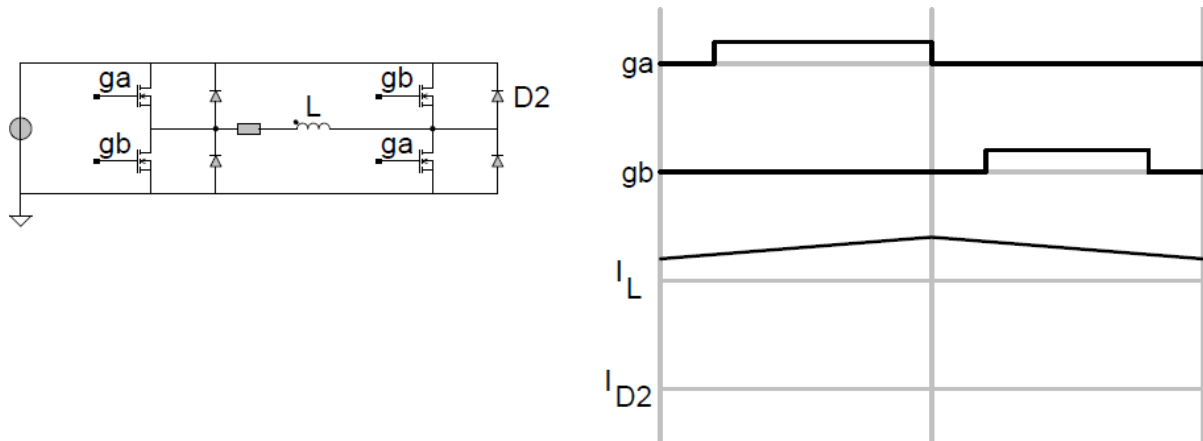
Minstens twee van de onderstaande grootheden noemen

1. Spanning : bij hogere dc spanning krijg je meer schakelverliezen E_{on} en E_{off} zijn afhankelijk van de DC spanning
2. Stroom: bij hogere stroom krijg je meer doorlaat en schakelverlies
3. Temperatuur: de weerstaand van de halfgeleider wordt groter en daardoor meer doorlaatverlies. De schakelverliezen nemen toe met toenemende temperatuur
4. Schakelfrequentie: Hogere schakelfrequentie, evenredig meer schakelverliezen
5. R_{ds}^{on} : Grotere R_{ds} dan ook meer doorlaatverliezen

Vraag 3, (1 + 1 punten)

Bij een 1-fase inverter met RL belasting wordt een deadtime in een inverter gemeten van $1\mu s$. Teken de stroom door D2 voor een R-L belasting van $R = 10\Omega$ en $L = 100mH$. $V_{dc} = 48volt$ modulatie index $m = 1$

(a) Teken in onderstaande figuur de stroom door D2



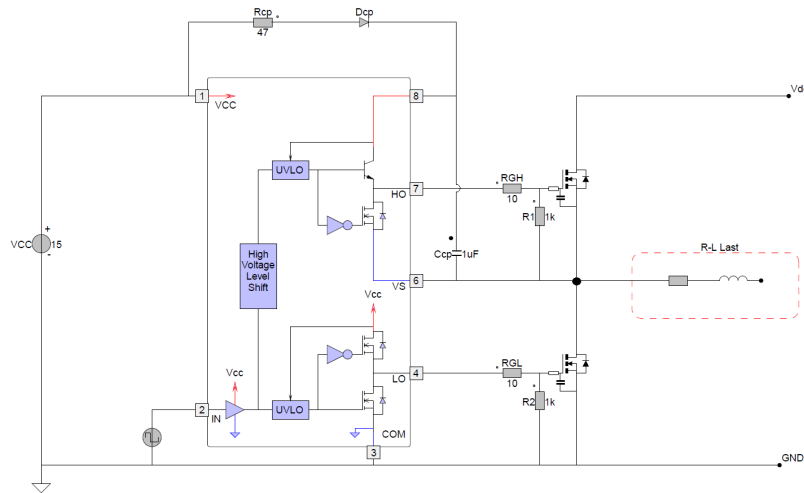
(b) De inverter is gemaakt met Mosfets meten interne antiparallele diode. De 4 Mosfets worden nu vervangen door 4 IGBT's. Moeten de dioden ook vervangen worden?

Antwoord:

Als de Mosfet vervangen wordt door een IGBT, moet er wel een antiparallele diode in de inverter blijven. Een mosfet heeft een interne diode, dus als je deze vervangt door een IGBT, moet er wel een diode in de inverter aanwezig blijven.

Vraag 4, (1+1 punten)

In onderstaande schakeling zit een condensator C_{cp} , een diode D_{cp} en een weerstand R_{cp} , verbonden met de voeding V_{cc} . Ook is de condensator verbonden met pin [6] en met pin [8] van de gatedriver.



De High-side Mosfet en de low-side Mosfet worden met een schakelfrequentie van $45kHz$ met een dutycycle van 25% geschakeld.

- (a) Wat is de functie van de diode D_{cp}
- (b) Wat is de functie van de weerstand R_{cp}

Antwoord:

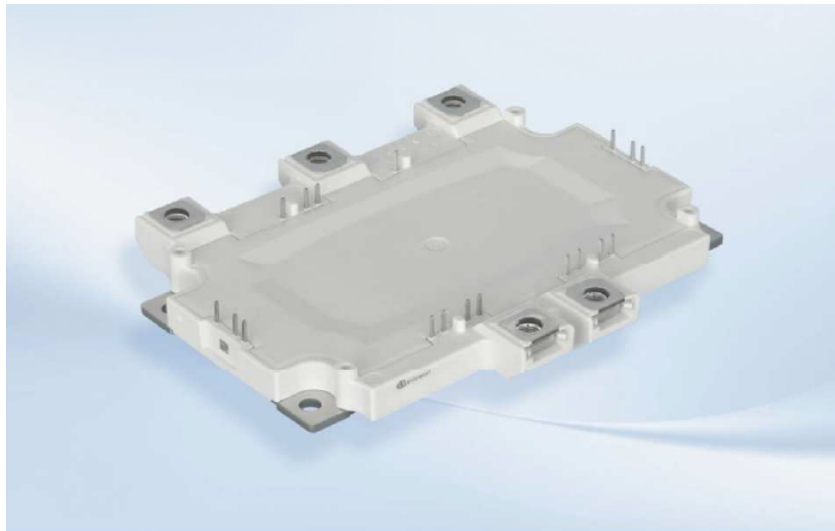
- (a) Zodra de low side mosfet uitgaat, zwiept de spanning op pin [8] omhoog en kan hoger worden dan V_{cc} . De diode zorgt ervoor dat de condensator niet leeg loopt in V_{cc} . (Alleen opschrijven dat D de stroom kan tegenhopuden is niet voldoende antwoord.)
- (b) De weerstand R_{cp} begrenst de laadstroom tijdens dit process, met name tijdens het starten als de spanning over C_{cp} nog $V(C_{cp} = 0)$ is.

Vraag 5, (1 + 1 punten)

Een IGBT inverter wordt gemaakt met een *FS400R07A1E3* Hybridpack module, zie de appendix. De temperatuur van de Junction van de IGBT mag maximaal *125graden* worden en die temperatuur gebruik je voor het aflezen van de verliezen in de datasheet!

De inverter moet $I_{rms} = 400\text{Ampere}$ leveren bij een DC spanning van $V_{dc} = 300\text{volt}$

Verder is nog: $F_s = 10\text{kHz}$, $V_{gate} = 15\text{volt}$, $R_{gate} = 1.8$, $V_{ce - max} = 300\text{volt}$



- (a) Wat is de invloed van de schakelfrequentie op de totale verliezen als deze van 10kHz naar 20kHz gaat?
- (b) In de datasheet staat de thermische weerstand van de Junctie naar behuizing(case) gegeven. Als de junctie 125 graden celsius is en de case is nog 25 graden celsius, hoeveel verliesvermogen komt er dan uit deze igt module. De waarde van de thermische weerstand moet je uit de datasheet halen.

Antwoord:

- (a) De schakelverliezen worden twee keer groter, de doorlaat verliezen blijven gelijk
- (b) $R_{thJC} = 0.12\text{k/W}$, dus $P_{verlies} = 125 - 25/0.12 = 833\text{Watt}$

HybridPACK™ 1 Module

FS400R07A1E3

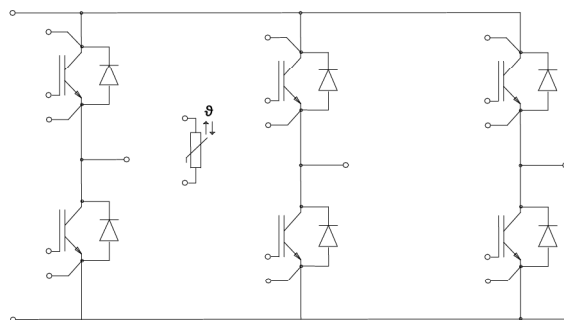
Final Data Sheet

V3.4, 2018-08-09

Automotive High Power

1 Features / Description

HybridPACK™ 1 module with Trench/Fieldstop IGBT3 and Emitter Controlled 3 diode and NTC



$V_{CES} = 650V$

$I_{C\ nom} = 400A$

Typical Applications

- Automotive Applications
- Hybrid Electrical Vehicles (H)EV
- Commercial Agriculture Vehicles
- Motor Drives
- Optimized for automotive applications with DC link voltages up to 420 V

Electrical Features

- Low Switching Losses
- LOW V_{CESat}
- $T_{vj\ op} = 150^{\circ}C$
- V_{CESat} with positive Temperature Coefficient

Mechanical Features

- 2.5kV AC 1min Insulation
- Al_2O_3 Substrate with Low Thermal Resistance
- High mechanical robustness
- Integrated NTC temperature sensor
- Copper Base Plate
- RoHS compliant

Description

Infineon®'s HybridPACK™ 1 is an automotive qualified power module designed for electric vehicle applications for a power range up to 20–30kW. Designed for a 150°C junction operation temperature, the module accommodates a 3-phase Six-Pack configuration of Trench-Field-Stop IGBT3 and matching emitter controlled diodes.

The HybridPACK™ 1 power module is built on Infineon's long time experience in the development of IGBT power modules, intense research efforts of new material combinations and assembly technologies. HybridPACK™ 1 is suitable for air or liquid cooling. The copper base plate combined with high-performance ceramic substrate and Infineon's enhanced wire-bonding process provides unparalleled thermal and power cycling capability and highest reliability for mild hybrid inverter or generator applications. For a compact design the driver stage PCB can easily be soldered on top of the module. All power connections are realized with screw terminals.

Product Name	Ordering Code
FS400R07A1E3	SP000663446

2 IGBT, Inverter

2.1 Maximum Rated Values

Parameter	Conditions	Symbol	Value	Unit
Collector-emitter voltage	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$	V_{CES}	650	V
Continuous DC collector current	$T_C = 65^{\circ}\text{C}, T_{vj \text{ max}} = 175^{\circ}\text{C}$ $T_C = 25^{\circ}\text{C}, T_{vj \text{ max}} = 175^{\circ}\text{C}$	$I_{C \text{ nom}}$	400	A
		I_C	500	A
Repetitive peak collector current	$t_p = 1 \text{ ms}$	I_{CRM}	800	A
Total power dissipation	$T_C = 25^{\circ}\text{C}, T_{vj \text{ max}} = 175^{\circ}\text{C}$	P_{tot}	1250	W
Gate-emitter peak voltage		V_{GES}	+/-20	V

2.2 Characteristic Values

				min.	typ.	max.	
Collector-emitter saturation voltage	$I_C = 400 \text{ A}, V_{GE} = 15 \text{ V}$ $I_C = 400 \text{ A}, V_{GE} = 15 \text{ V}$ $I_C = 400 \text{ A}, V_{GE} = 15 \text{ V}$	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 125^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 150^{\circ}\text{C}$	$V_{CE \text{ sat}}$		1.45 1.60 1.70	1.90	V
Gate threshold voltage	$I_C = 6.40 \text{ mA}, V_{CE} = V_{GE}$	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$	V_{GEth}	4.90	5.80	6.50	V
Gate charge	$V_{GE} = -15 \text{ V} \dots 15 \text{ V}$		Q_G		4.30		μC
Internal gate resistor		$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$	R_{Gint}		1.0		Ω
Input capacitance	$f = 1 \text{ MHz}, V_{CE} = 25 \text{ V}, V_{GE} = 0 \text{ V}$	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$	C_{ies}		26.0		nF
Reverse transfer capacitance	$f = 1 \text{ MHz}, V_{CE} = 25 \text{ V}, V_{GE} = 0 \text{ V}$	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$	C_{res}		0.76		nF
Collector-emitter cut-off current	$V_{CE} = 650 \text{ V}, V_{GE} = 0 \text{ V}$	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$	I_{CES}			1.0	mA
Gate-emitter leakage current	$V_{CE} = 0 \text{ V}, V_{GE} = 20 \text{ V}$	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$	I_{GES}			400	nA
Turn-on delay time, inductive load	$I_C = 400 \text{ A}, V_{CE} = 300 \text{ V}$ $V_{GE} = \pm 15 \text{ V}$ $R_{Gon} = 1.8 \Omega$	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 125^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 150^{\circ}\text{C}$	t_{don}		0.10 0.11 0.12		μs
Rise time, inductive load	$I_C = 400 \text{ A}, V_{CE} = 300 \text{ V}$ $V_{GE} = \pm 15 \text{ V}$ $R_{Gon} = 1.8 \Omega$	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 125^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 150^{\circ}\text{C}$	t_r		0.08 0.08 0.08		μs
Turn-off delay time, inductive load	$I_C = 400 \text{ A}, V_{CE} = 300 \text{ V}$ $V_{GE} = \pm 15 \text{ V}$ $R_{Goff} = 1.8 \Omega$	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 125^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 150^{\circ}\text{C}$	t_{doff}		0.46 0.50 0.50		μs
Fall time, inductive load	$I_C = 400 \text{ A}, V_{CE} = 300 \text{ V}$ $V_{GE} = \pm 15 \text{ V}$ $R_{Goff} = 1.8 \Omega$	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 125^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 150^{\circ}\text{C}$	t_f		0.05 0.07 0.08		μs
Turn-on energy loss per pulse	$I_C = 400 \text{ A}, V_{CE} = 300 \text{ V}, L_S = 25 \text{ nH}$ $V_{GE} = \pm 15 \text{ V}, di/dt = 5500 \text{ A}/\mu\text{s} (T_{vj} = 150^{\circ}\text{C})$ $R_{Gon} = 1.8 \Omega$	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 125^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 150^{\circ}\text{C}$	E_{on}		2.90 4.20 4.50		mJ
Turn-off energy loss per pulse	$I_C = 400 \text{ A}, V_{CE} = 300 \text{ V}, L_S = 25 \text{ nH}$ $V_{GE} = \pm 15 \text{ V}, du/dt = 3000 \text{ V}/\mu\text{s} (T_{vj} = 150^{\circ}\text{C})$ $R_{Goff} = 1.8 \Omega$	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 125^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 150^{\circ}\text{C}$	E_{off}		13.0 16.0 17.0		mJ
SC data	$V_{GE} \leq 15 \text{ V}, V_{CC} = 360 \text{ V}$ $V_{CEmax} = V_{CES} - L_{sCE} \cdot di/dt$	$t_p \leq 8 \mu\text{s}, T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$ $t_p \leq 6 \mu\text{s}, T_{vj} = 150^{\circ}\text{C}$	I_{SC}		2800 2000		A
Thermal resistance, junction to case	per IGBT		R_{thJC}			0.120	K/W
Thermal resistance, case to heatsink	per IGBT $\lambda_{Paste} = 1 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K}) / \lambda_{grease} = 1 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$		R_{thCH}		0.080		K/W
Temperature under switching conditions	$t_{op} \text{ continuous}$		$T_{vj \text{ op}}$	-40		150	$^{\circ}\text{C}$

3 Diode, Inverter

3.1 Maximum Rated Values

Parameter	Conditions	Symbol	Value	Unit
Repetitive peak reverse voltage	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$	V_{RRM}	650	V
Continuous DC forward current		I_F	400	A
Repetitive peak forward current	$t_P = 1 \text{ ms}$	I_{FRM}	800	A
I^2t - value	$V_R = 0 \text{ V}$, $t_P = 10 \text{ ms}$, $T_{vj} = 125^{\circ}\text{C}$ $V_R = 0 \text{ V}$, $t_P = 10 \text{ ms}$, $T_{vj} = 150^{\circ}\text{C}$	I^2t	8800 8500	A^2s A^2s

3.2 Characteristic Values

			min.	typ.	max.	
Forward voltage	$I_F = 400 \text{ A}$, $V_{GE} = 0 \text{ V}$ $I_F = 400 \text{ A}$, $V_{GE} = 0 \text{ V}$ $I_F = 400 \text{ A}$, $V_{GE} = 0 \text{ V}$	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 125^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 150^{\circ}\text{C}$	V_F	1.55 1.50 1.45	1.95	V
Peak reverse recovery current	$I_F = 400 \text{ A}$, $-di_F/dt = 5500 \text{ A}/\mu\text{s}$ ($T_{vj} = 150^{\circ}\text{C}$) $V_R = 300 \text{ V}$ $V_{GE} = -15 \text{ V}$	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 125^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 150^{\circ}\text{C}$	I_{RM}	210 280 300		A
Recovered charge	$I_F = 400 \text{ A}$, $-di_F/dt = 5500 \text{ A}/\mu\text{s}$ ($T_{vj} = 150^{\circ}\text{C}$) $V_R = 300 \text{ V}$ $V_{GE} = -15 \text{ V}$	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 125^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 150^{\circ}\text{C}$	Q_r	18.0 30.0 34.0		μC
Reverse recovery energy	$I_F = 400 \text{ A}$, $-di_F/dt = 5500 \text{ A}/\mu\text{s}$ ($T_{vj} = 150^{\circ}\text{C}$) $V_R = 300 \text{ V}$ $V_{GE} = -15 \text{ V}$	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 125^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 150^{\circ}\text{C}$	E_{rec}	3.60 7.25 8.30		mJ
Thermal resistance, junction to case	per diode		R_{thJC}		0.200	K/W
Thermal resistance, case to heatsink	per diode $\lambda_{\text{Paste}} = 1 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ / $\lambda_{\text{grease}} = 1 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$		R_{thCH}	0.085		K/W
Temperature under switching conditions	t_{op} continuous		$T_{vj op}$	-40	150	$^{\circ}\text{C}$

4 NTC-Thermistor

			min.	typ.	max.	
Parameter	Conditions	Symbol	Value			Unit
Rated resistance	$T_C = 25^{\circ}\text{C}$	R_{25}		5.00		k Ω
Deviation of R100	$T_C = 100^{\circ}\text{C}$, $R_{100} = 493 \Omega$	$\Delta R/R$	5		5	%
Power dissipation	$T_C = 25^{\circ}\text{C}$	P_{25}			20.0	mW
B-value	$R_2 = R_{25} \exp [B_{25/50}(1/T_2 - 1/(298,15 \text{ K}))]$	$B_{25/50}$		3375		K
B-value	$R_2 = R_{25} \exp [B_{25/80}(1/T_2 - 1/(298,15 \text{ K}))]$	$B_{25/80}$		3411		K
B-value	$R_2 = R_{25} \exp [B_{25/100}(1/T_2 - 1/(298,15 \text{ K}))]$	$B_{25/100}$		3433		K

Specification according to the valid application note.

5 Module

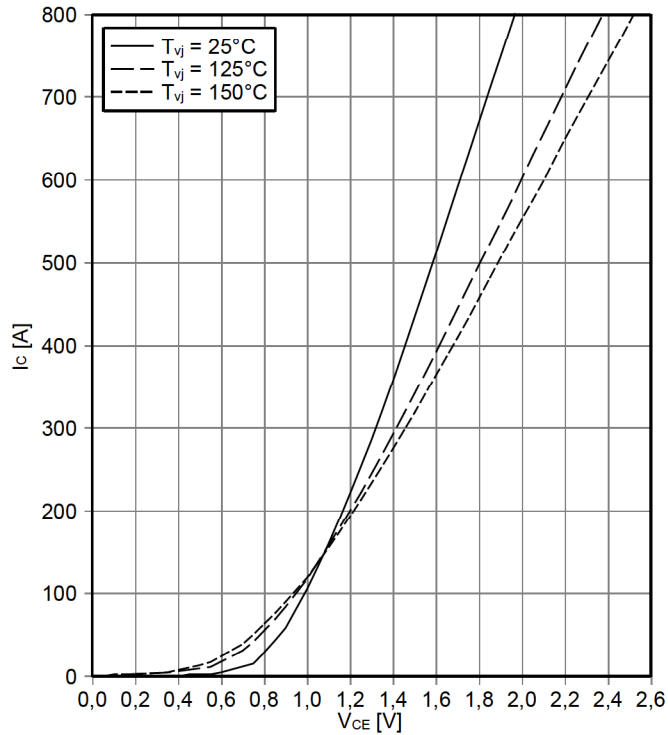
Parameter	Conditions	Symbol	Value	Unit
Isolation test voltage	RMS, f = 50 Hz, t = 1 min.	V _{ISOL}	2.5	kV
Material of module baseplate			Cu	
Internal isolation	basic insulation (class 1, IEC 61140)		Al ₂ O ₃	
Creepage distance	terminal to heatsink terminal to terminal	d _{Creep}	12.0 6.1	mm
Clearance	terminal to heatsink terminal to terminal	d _{Clear}	12.0 6.1	mm
Comperative tracking index		CTI	> 200	
			min. typ. max.	
Stray inductance module		L _{sCE}		30 nH
Module lead resistance, terminals - chip	T _C = 25 °C, per switch	R _{CC'+EE'}	1.00	mΩ
Storage temperature		T _{stg}	-40	125 °C
Mounting torque for modul mounting	Screw M5 baseplate to heatsink	M	3.00	6.00 Nm
Terminal connection torque	Screw M6	M	3.0	- 6.0 Nm
Weight		G	485	g

Der Kollektor-Dauergleichstrom / Dioden-Dauergleichstrom ist durch die Lastanschlüsse begrenzt.
 DC-collector current / diode forward current limited by power terminals.

6 Characteristics Diagrams

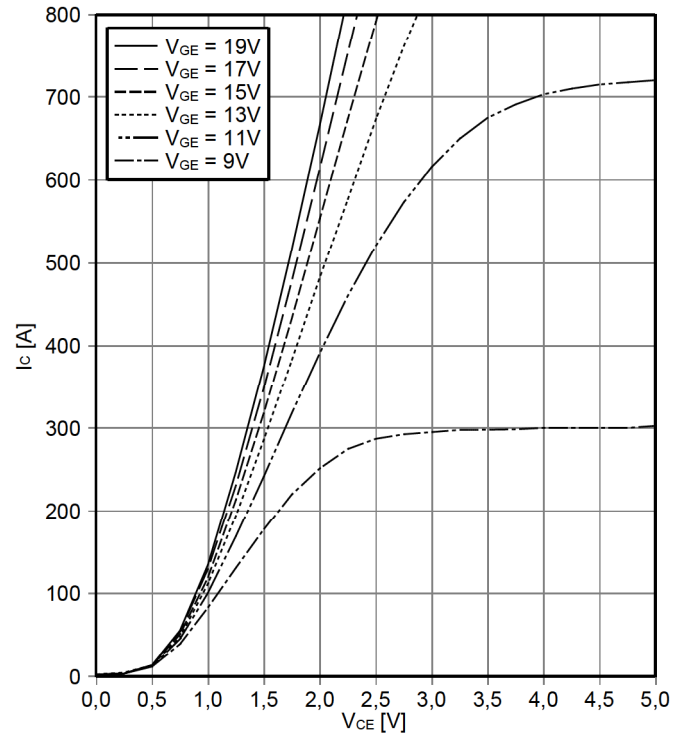
output characteristic IGBT, Inverter (typical)

$I_C = f(V_{CE})$
 $V_{GE} = 15 \text{ V}$



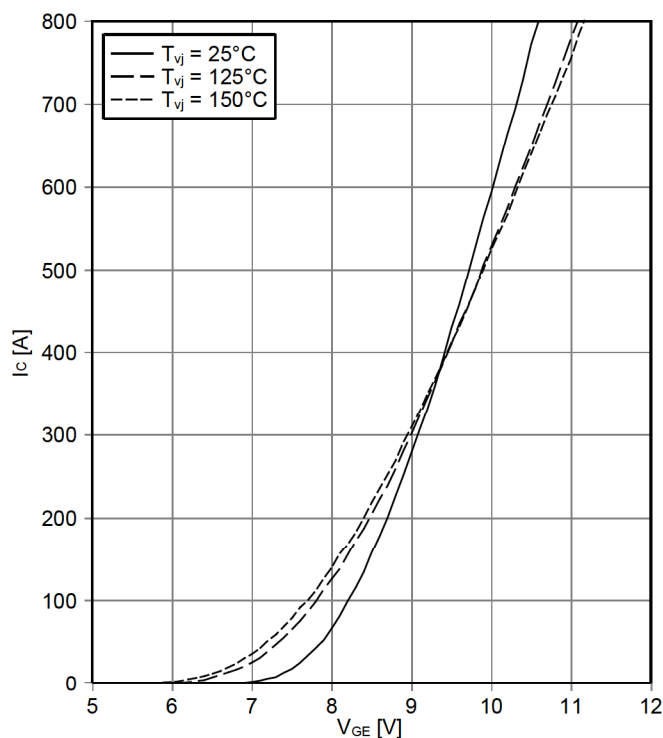
output characteristic IGBT, Inverter (typical)

$I_C = f(V_{CE})$
 $T_{vj} = 150^\circ\text{C}$



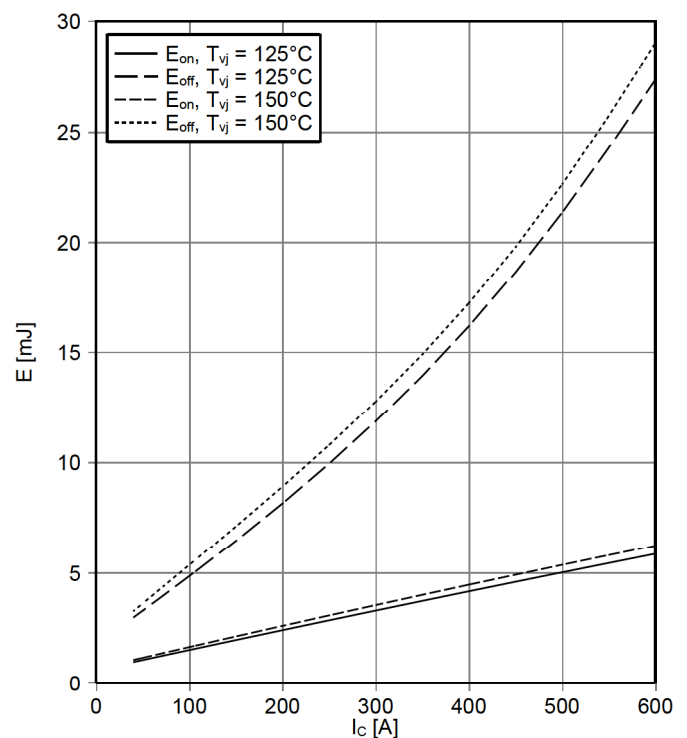
transfer characteristic IGBT, Inverter (typical)

$I_C = f(V_{GE})$
 $V_{CE} = 20 \text{ V}$



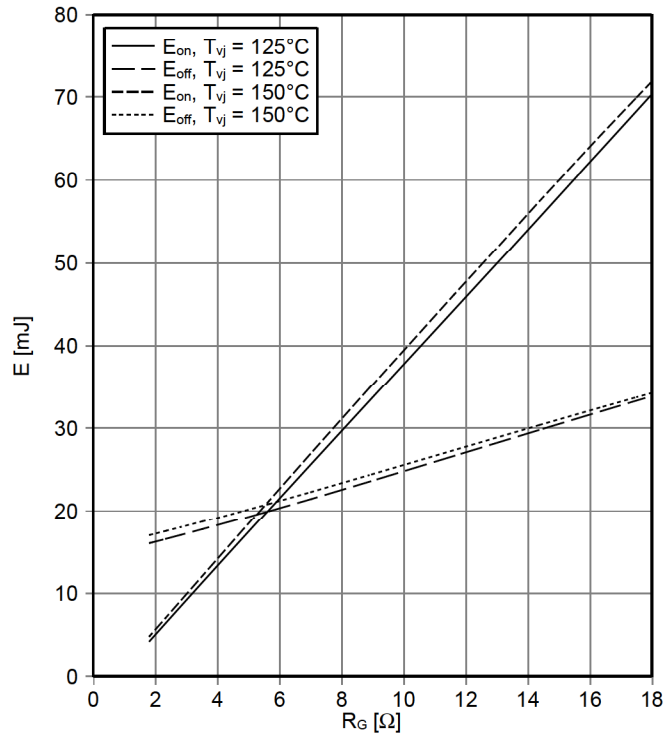
switching losses IGBT, Inverter (typical)

$E_{on} = f(I_C)$, $E_{off} = f(I_C)$
 $V_{GE} = \pm 15 \text{ V}$, $R_{Gon} = 1.8 \Omega$, $R_{Goff} = 1.8 \Omega$, $V_{CE} = 300 \text{ V}$



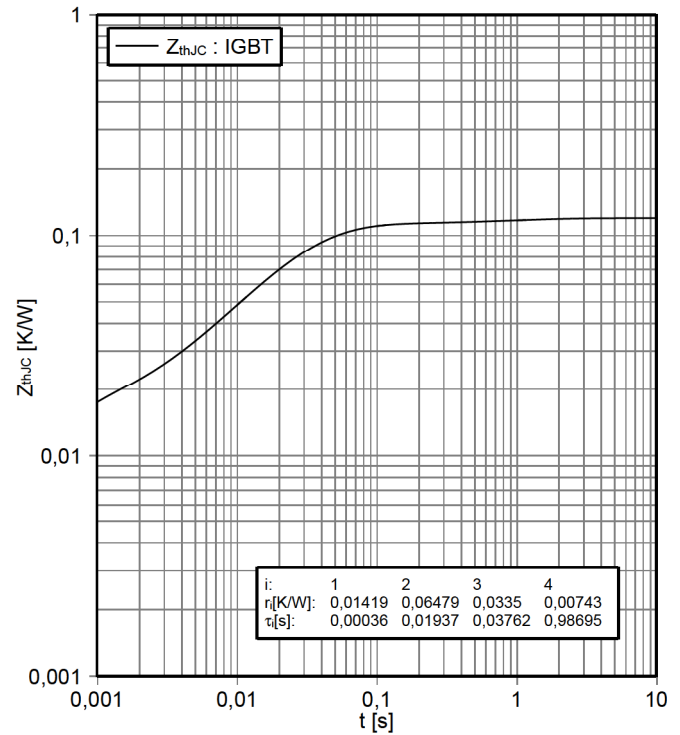
switching losses IGBT, Inverter (typical)

$E_{on} = f(R_G)$, $E_{off} = f(R_G)$
 $V_{GE} = \pm 15 \text{ V}$, $I_C = 400 \text{ A}$, $V_{CE} = 300 \text{ V}$



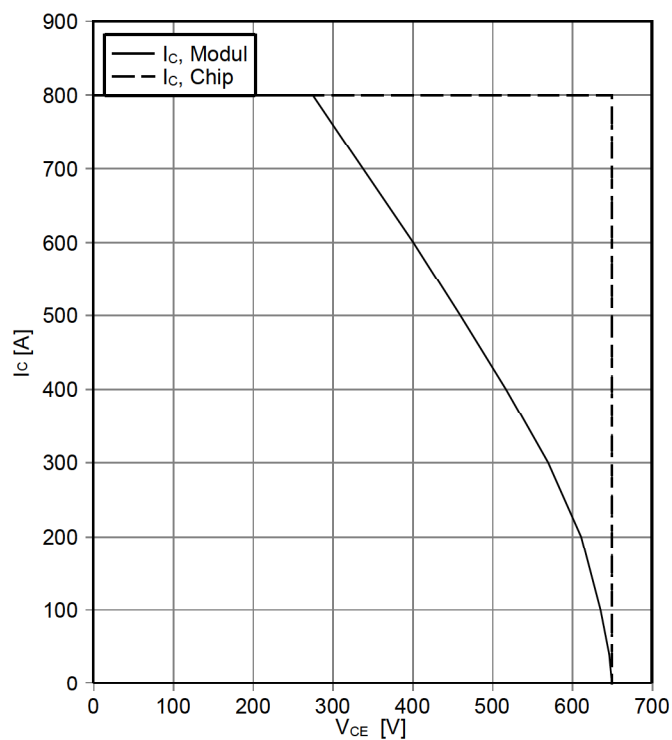
transient thermal impedance IGBT, Inverter

$Z_{thJC} = f(t)$



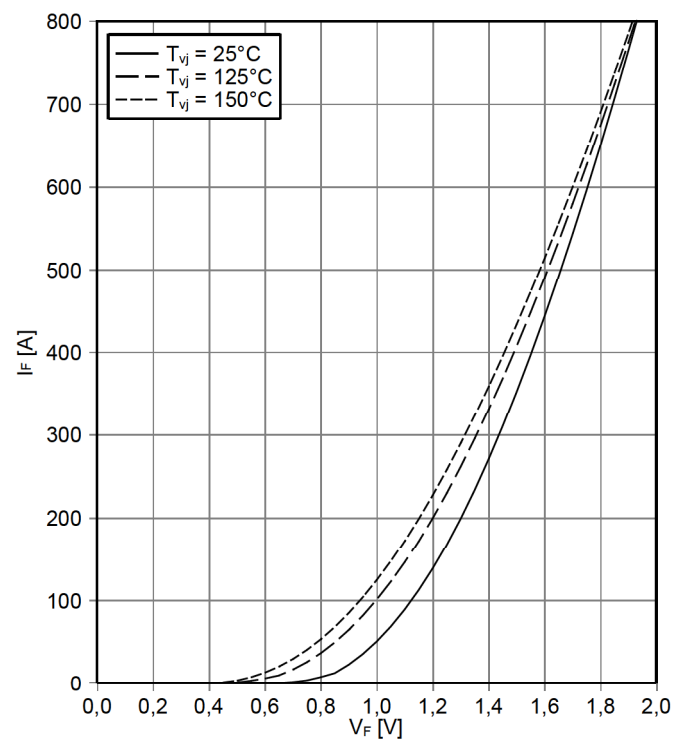
reverse bias safe operating area IGBT, Inverter (RBSOA)

$I_C = f(V_{CE})$
 $V_{GE} = \pm 15 \text{ V}$, $R_{Goff} = 1.8 \Omega$, $T_{vj} = 150^\circ\text{C}$



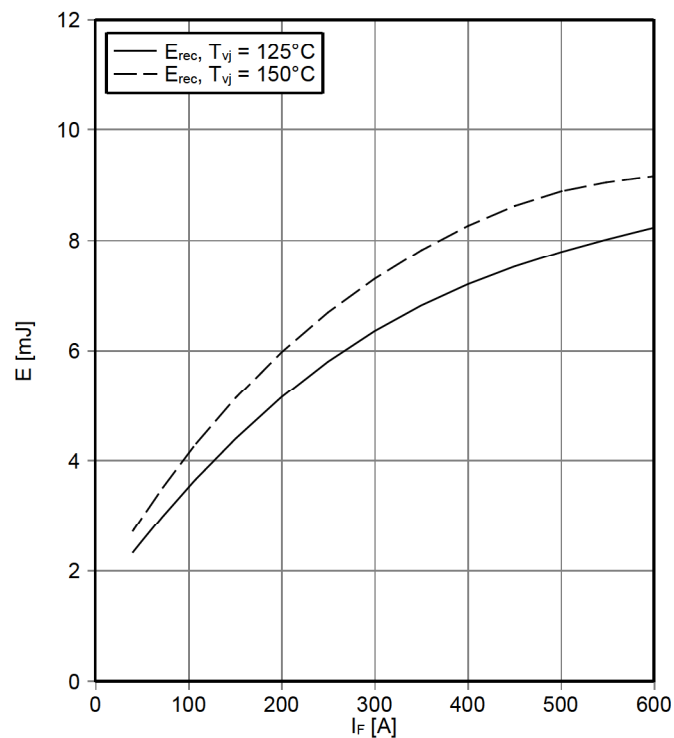
forward characteristic of Diode, Inverter (typical)

$I_F = f(V_F)$



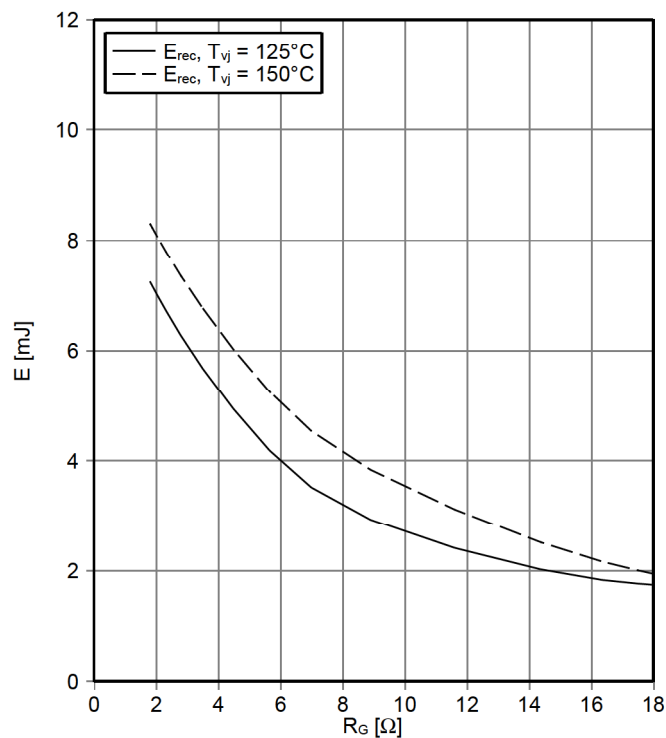
switching losses Diode, Inverter (typical)

$E_{rec} = f(I_F)$
 $R_{Gon} = 1.8 \Omega$, $V_{CE} = 300 \text{ V}$



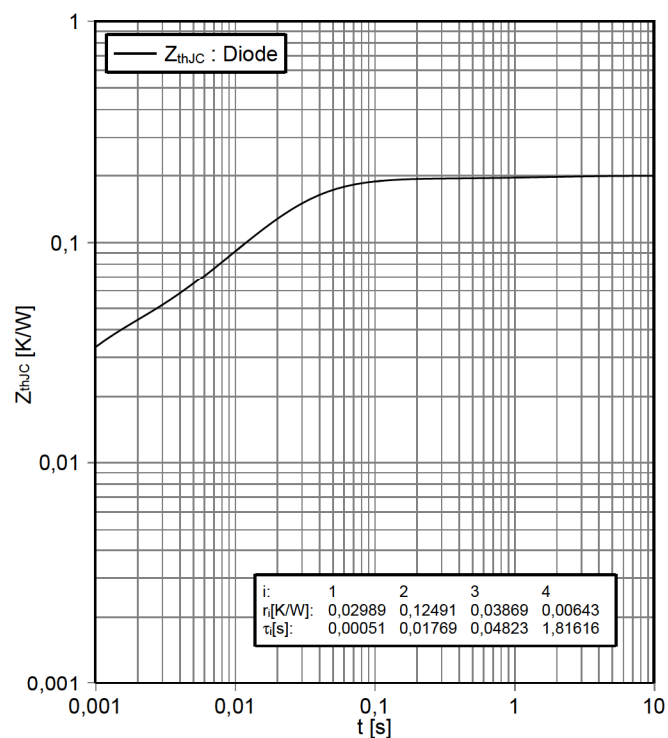
switching losses Diode, Inverter (typical)

$E_{rec} = f(R_G)$
 $I_F = 400 \text{ A}$, $V_{CE} = 300 \text{ V}$



transient thermal impedance Diode, Inverter

$Z_{thJC} = f(t)$



NTC-Thermistor-temperature characteristic (typical)

$R = f(T)$

