

Partie 1 : Etude de documentations IGBT

Qu'est ce que le transistor IGBT ?

La technologie IGBT a été créée en 1982, elle s'est imposée dans les gammes de tensions allant de 600V à 3300V.

L'IGBT est un transistor hybride, regroupant un transistor à effet de champ du type MOSFET en entrée et un transistor bipolaire en sortie. Il est ainsi commandé par la tension de grille (entre grille et émetteur). Mais ses caractéristiques de conduction (entre collecteur et émetteur) sont celles d'un bipolaire.

Cette structure lui donne le faible coût énergétique de commande d'un MOSFET, avec les pertes de conduction plus faibles d'un bipolaire. De plus, les IGBT peuvent gérer une tension bien plus élevée que celle gérée par les MOSFET.

Cependant, le transistor IGBT a comme inconvénient d'avoir un temps de blocage lent ce qui augmente les pertes par commutation.

Dans quel domaine ?

On retrouve ce type de semi-conducteur dans la conversion d'énergie (onduleurs, redresseurs et hacheurs pour les alimentations à découpage et la vitesse variable).

Performances du IGBT ?

Caractéristiques moyennes comparées

	MOSFET 600V	IGBT 600V	IGBT 1700V	IGBT 3300V	IGBT 6500V	GTO 6000V
V_{CEsat} ⁸ à 125 °C	2,2 V	1,8 V	2,5 V	3,5 V	5,3 V	3 V
fréquence typique ⁹	15-100 kHz	6-40 kHz	3-10 kHz	1-5 kHz	0,8-2 kHz	0,3-1 kHz

Différentes structures du IGBT :

IGBT NPT : « pas de coup de poing »

IGBT PT : « Coup de poing »

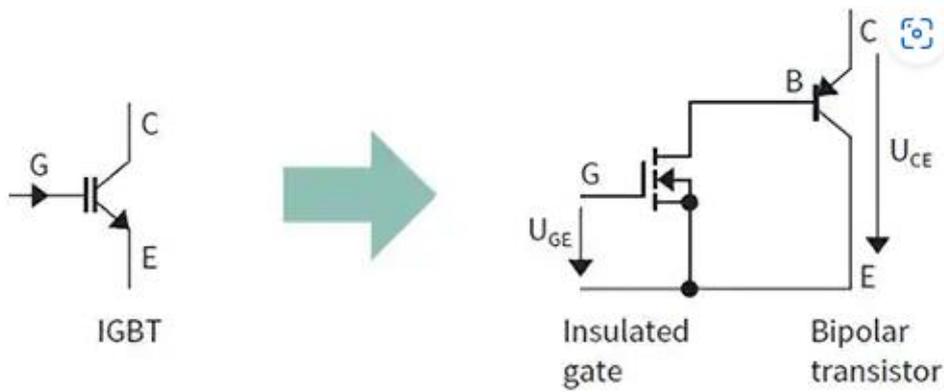


Figure 3 : Structure conceptuelle d'un IGBT montrant le MOSFET qui constitue la grille isolée et la structure du transistor bipolaire qui représente la section de tenue en puissance. (Source de l'image : Infineon Technologies)

La référence de l'IGBT donne déjà de nombreuses informations sur ses caractéristiques : On prend comme exemple les IGBT de la marque STMicroelectronics

Partie 1 – Etude des caractéristiques des transistors IGBT

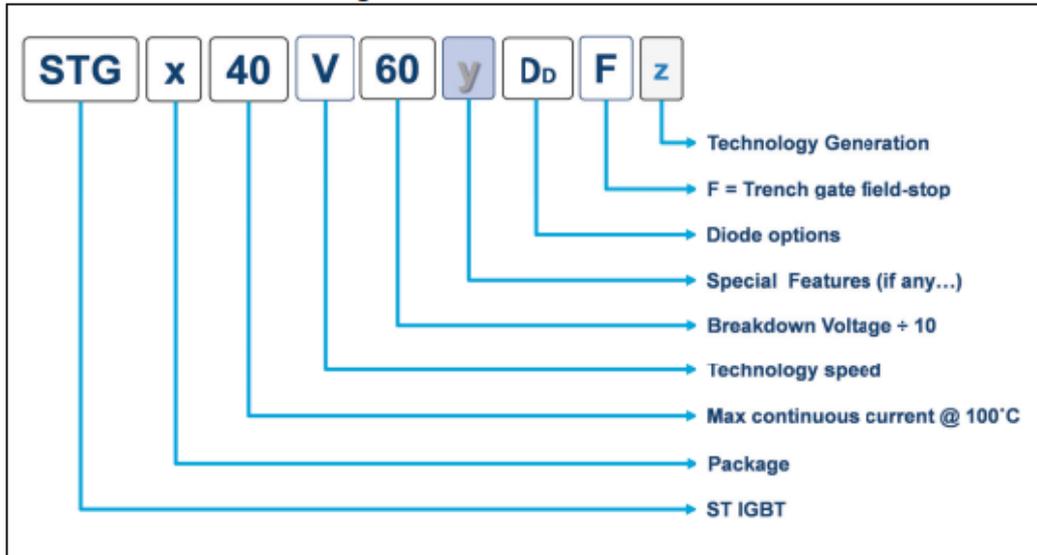
Partie 2 – Comparaison entre les marques pour les IGBT

Partie 3 – Etude des caractéristiques des transistor Mosfets

Partie 4 – Comparaison entre les marques pour les Mosfets

1- STMicroelectronics

Figure 4. Nomenclature scheme



Valeurs maximales des composants de STmicroelectronics

Pour une température de T_c=25°C

Références	STG FW 40 V 60 D F	STG W 40 V 60 D F	STG WT 40 V 60 DF	NGT G 50 N 60 FWG
Température maximale de jonction (T _j)	175°C	175°C	175°C	150°C
Tension maximale (V _{ce} max avec V _{ge} =0V)	600V	600V	600V	600V
Courant collecteur (I _c)	80A, 40A pour T _c =100°C	80A, 40A pour T _c =100°C	80A, 40A pour T _c =100°C	100A, 50A pour T _c =100°C
Option de Paquet (Package option)	TO-3PF	TO-247	TO-3P	TO-247
Courant pulsé du collecteur (I _{CM})	160A	160A	160A	200A
V _{ge}	+20V	+20V	+20V	+20V
Puissance dissipé maximale (P _{tot})	283W	283W	283W	223W
Température maximale de stockage (T _{stg})	-55 to 150°C	-55 to 150°C	-55 to 150°C	-55 to 150°C

Température de jonction de fonctionnement (Tj)	-55 to 175°C	-55 to 175°C	-55 to 175°C	-55 to 150°C
Température du plomb pour le soudage, 1/8 po de l'étui pendant 5 secondes				260°C
Resistance thermique boitier de jonction (RthJC)	0.53°C/W	0.53°C/W	0.53°C/W	0.56°C/W
Resistance thermique diode de jonction (RthJCD)	1.14°C/W	1.14°C/W	1.14°C/W	
Resistance thermique Jonction Ambiante (RthJA)	50°C/W	50°C/W	50°C/W	40°C/W

Equation 1 :

Tjmax : Température maximale de jonction en °C

Tc : Température du collecteur en °C

Rth(J-C) : Résistance thermique du boitier de jonction en °C/W

Vce : Tension entre collecteur et émetteur

Ic : Courant collecteur

$$P_{TOT} = \frac{T_{Jmax} - T_C}{R_{th(J-C)}} = V_{CE} \cdot I_C$$

Equation 2 :

$$R_{CEO} = \frac{\Delta V_{CE}}{\Delta I_C}$$

Rceo est donc la valeur de la pente de la caractéristique du courant collecteur en fonction de la tension collecteur émetteur.

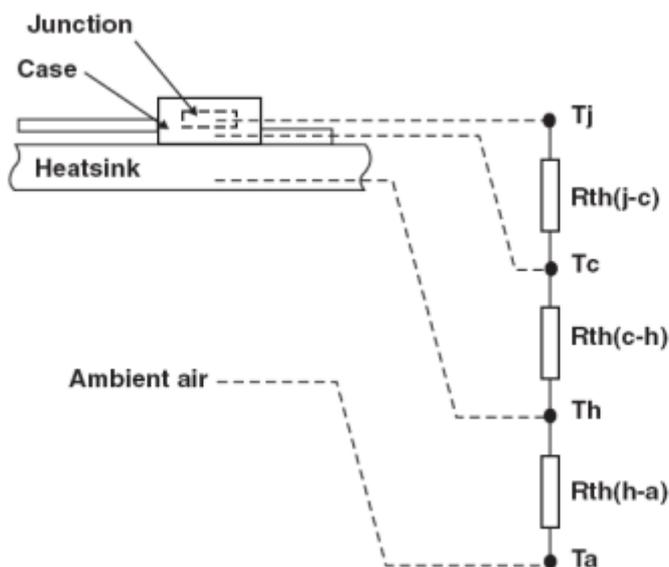
Equation 3 :

$$I_C = \frac{-V_{CEO} + \sqrt{V_{CEO}^2 + 4 \cdot R_{CEO} \cdot \left(\frac{T_{Jmax} - T_C}{R_{TH(JC)}} \right)}}{2 \cdot R_{CEO}}$$

Le courant de collecteur peut se calculer avec cette expression.

Equation 4 :

$$R_{th(j-a)} = R_{th(j-c)} + R_{th(c-h)} + R_{th(h-a)}$$



$R_{th(j-a)}$: Résistance thermique de la jonction jusqu'à l'air ambiant

$R_{th(j-c)}$: Résistance thermique de la jonction de l'appareil au boîtier de l'appareil. C'est la R_{th} lorsque l'emballage est monté sur le dissipateur thermique infini.

$R_{th(c-h)}$: la résistance thermique de contact entre le boîtier de l'appareil et le dissipateur thermique

$R_{th(h-a)}$: résistance thermique du dissipateur thermique à l'environnement

$$T_j = T_{Jstart} + \Delta T_j = T_{Jstart} + Z_{thJc}(t_p, \delta) \times P_{tot} = T_{Jstart} + k(t_p, \delta) \times R_{thJc} \times P_{tot}$$

Caractéristiques Statiques

Table 8. Static characteristics

Symbol	Parameter	Test conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
$V_{(BR)CES}$	Collector-emitter breakdown voltage ($V_{GE} = 0$)	$I_C = 2 \text{ mA}$	600			V
$V_{CE(sat)}$	Collector-emitter saturation voltage	$V_{GE} = 15 \text{ V}, I_C = 40 \text{ A}$		1.8	2.3	V
		$V_{GE} = 15 \text{ V}, I_C = 40 \text{ A}$ $T_J = 125 \text{ }^\circ\text{C}$		2.15		
		$V_{GE} = 15 \text{ V}, I_C = 40 \text{ A}$ $T_J = 175 \text{ }^\circ\text{C}$		2.35		
V_F	Forward on-voltage	$I_F = 40 \text{ A}$		1.7	2.45	V
		$I_F = 40 \text{ A}, T_J = 125 \text{ }^\circ\text{C}$		1.4		V
		$I_F = 40 \text{ A}, T_J = 175 \text{ }^\circ\text{C}$		1.3		V
$V_{GE(th)}$	Gate threshold voltage	$V_{CE} = V_{GE}, I_C = 1 \text{ mA}$	5	6	7	V
I_{CES}	Collector cut-off current ($V_{GE} = 0$)	$V_{CE} = 600 \text{ V}$			25	μA
I_{GES}	Gate-emitter leakage current ($V_{CE} = 0$)	$V_{GE} = \pm 20 \text{ V}$			250	nA

Pour le NGT G 50 N 60 FWG

STATIC CHARACTERISTIC						
Collector-emitter breakdown voltage, gate-emitter short-circuited	$V_{GE} = 0 \text{ V}, I_C = 500 \text{ } \mu\text{A}$	$V_{(BR)CES}$	600	-	-	V
Collector-emitter saturation voltage	$V_{GE} = 15 \text{ V}, I_C = 50 \text{ A}$ $V_{GE} = 15 \text{ V}, I_C = 50 \text{ A}, T_J = 150^\circ\text{C}$	V_{CEsat}	1.25 -	1.45 1.7	1.7 -	V
Gate-emitter threshold voltage	$V_{GE} = V_{CE}, I_C = 350 \text{ } \mu\text{A}$	$V_{GE(th)}$	4.5	5.5	6.5	V
Collector-emitter cut-off current, gate-emitter short-circuited	$V_{GE} = 0 \text{ V}, V_{CE} = 600 \text{ V}$ $V_{GE} = 0 \text{ V}, V_{CE} = 600 \text{ V}, T_J = 150^\circ\text{C}$	I_{CES}	- -	- -	0.5 2	mA
Gate leakage current, collector-emitter short-circuited	$V_{GE} = 20 \text{ V}, V_{CE} = 0 \text{ V}$	I_{GES}	-	-	200	nA

DYNAMIC CHARACTERISTIC

Equation 8 :

$$V_{CE(sat)} = V_{BE(PNP)} + I_{MOS} \times (R_S + R_{CH})$$

Caractéristiques Dynamique

Table 9. Dynamic characteristics

Symbol	Parameter	Test conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
C_{ies}	Input capacitance	$V_{CE} = 25 \text{ V}, f = 1 \text{ MHz}, V_{GE} = 0$	-	5400	-	pF
C_{oes}	Output capacitance		-	220	-	pF
C_{res}	Reverse transfer capacitance		-	180	-	pF
Q_g	Total gate charge	$V_{CC} = 480 \text{ V}, I_C = 40 \text{ A}, V_{GE} = 15 \text{ V}$	-	226	-	nC
Q_{ge}	Gate-emitter charge		-	38	-	nC
Q_{gc}	Gate-collector charge		-	95	-	nC

Pour le NGT G 50 N 60 FWG

DYNAMIC CHARACTERISTIC

Input capacitance	$V_{CE} = 20 \text{ V}, V_{GE} = 0 \text{ V}, f = 1 \text{ MHz}$	C_{ies}	-	7300	-	pF
Output capacitance		C_{oes}	-	195	-	
Reverse transfer capacitance		C_{res}	-	170	-	
Gate charge total	$V_{CE} = 480 \text{ V}, I_C = 50 \text{ A}, V_{GE} = 15 \text{ V}$	Q_g	-	310	-	nC
Gate to emitter charge		Q_{ge}	-	60	-	
Gate to collector charge		Q_{gc}	-	150	-	

Equation 9 :

$$C_{ies} = C_{GE} + C_{GC}$$

Equation 10 :

$$C_{oes} = C_{CE} + C_{GC}$$

Equation 11 :

$$C_{res} = C_{GC}$$

Caractéristiques de commutation du IGBT (charge inductive)

Symbol	Parameter	Test conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
$t_{d(on)}$	Turn-on delay time	$V_{CE} = 400 \text{ V}, I_C = 40 \text{ A},$ $R_G = 10 \Omega, V_{GE} = 15 \text{ V}$	-	52	-	ns
t_r	Current rise time		-	17	-	ns
$(di/dt)_{on}$	Turn-on current slope		-	1850	-	A/ μ s
$t_{d(off)}$	Turn-off delay time		-	208	-	ns
t_f	Current fall time		-	20	-	ns
E_{on}	Turn-on switching losses		-	456	-	μ J
E_{off}	Turn-off switching losses		-	411	-	μ J
E_{ts}	Total switching losses		-	867	-	μ J
$t_{d(on)}$	Turn-on delay time	$V_{CE} = 400 \text{ V}, I_C = 40 \text{ A},$ $R_G = 10 \Omega, V_{GE} = 15 \text{ V},$ $T_J = 175 \text{ }^\circ\text{C}$	-	52	-	ns
t_r	Current rise time		-	21	-	ns
$(di/dt)_{on}$	Turn-on current slope		-	1538	-	A/ μ s
$t_{d(off)}$	Turn-off delay time		-	220	-	ns
t_f	Current fall time		-	21	-	ns
E_{on}	Turn-on switching losses		-	1330	-	μ J
E_{off}	Turn-off switching losses		-	560	-	μ J
E_{ts}	Total switching losses		-	1890	-	μ J

Temps de résistance au court circuit :

Table 11. Maximum ratings for short-circuit withstand time

Symbol	Description	Test conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
t_{sc}	Short-circuit withstand time	$V_{CC} \leq 360, V_{GE} = 15 \text{ V},$ $T_{jstart} \leq 150 \text{ }^\circ\text{C}$	6	-	-	μ s

Pour le NGT G 50 N 60 FWG

SWITCHING CHARACTERISTIC, INDUCTIVE LOAD

Turn-on delay time	$T_J = 25^\circ\text{C}$ $V_{CC} = 400\text{ V}, I_C = 50\text{ A}$ $R_g = 10\ \Omega$ $V_{GE} = 0\text{ V}/15\text{ V}^*$	$t_{d(on)}$	-	117	-	ns
Rise time		t_r	-	43	-	
Turn-off delay time		$t_{d(off)}$	-	285	-	
Fall time		t_f	-	105	-	
Turn-on switching loss		E_{on}	-	1.1	-	mJ
Turn-off switching loss		E_{off}	-	1.2	-	
Total switching loss		E_{ts}	-	2.3	-	
Turn-on delay time	$T_J = 150^\circ\text{C}$ $V_{CC} = 400\text{ V}, I_C = 50\text{ A}$ $R_g = 10\ \Omega$ $V_{GE} = 0\text{ V}/15\text{ V}^*$	$t_{d(on)}$	-	112	-	ns
Rise time		t_r	-	45	-	
Turn-off delay time		$t_{d(off)}$	-	300	-	
Fall time		t_f	-	214	-	
Turn-on switching loss		E_{on}	-	1.4	-	mJ
Turn-off switching loss		E_{off}	-	2.0	-	
Total switching loss		E_{ts}	-	3.4	-	

Caractéristiques de commutations des diodes (charge inductive)

Table 12. Diode switching characteristics (inductive load)

Symbol	Parameter	Test conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
t_{rr}	Reverse recovery time	$I_F = 40\text{ A}, V_R = 400\text{ V},$ $V_{GE} = 15\text{ V}, di/dt = 1000\text{ A}/\mu\text{s}$	-	41	-	ns
Q_{rr}	Reverse recovery charge		-	440	-	nC
I_{rrm}	Reverse recovery current		-	21.6	-	A
dl_{rr}/dt	Peak rate of fall of reverse recovery current during t_b		-	1363	-	A/ μs
E_{rr}	Reverse recovery energy		-	151	-	μJ
t_{rr}	Reverse recovery time	$I_F = 40\text{ A}, V_R = 400\text{ V},$ $V_{GE} = 15\text{ V}, di/dt = 1000\text{ A}/\mu\text{s}$ $T_J = 175^\circ\text{C}$	-	109	-	ns
Q_{rr}	Reverse recovery charge		-	2400	-	nC
I_{rrm}	Reverse recovery current		-	44.4	-	A
dl_{rr}/dt	Peak rate of fall of reverse recovery current during t_b		-	670	-	A/ μs
E_{rr}	Reverse recovery energy		-	718	-	μJ

2-Infineon

Valeurs maximales des composants de Infineon

Références	IGW60T120	IGW40N60F
Température maximale de jonction (Tj)	150°C	150°C
Tension maximale (Vce max avec Vge=0V)	1200V	600V
Courant collecteur (Ic)	100A	80A
Option de Paquet (Package option)	PG-TO-247-3	TO-3P
Courant pulsé du collecteur (ICM)	160A	120A
Vge	+ -20V	+ -20V
Puissance dissipé maximale (Ptot)	375W	280W
Température maximale de stockage (Tstg)	-55 to 150°C	-55 to 150°C
Température de jonction de fonctionnement (Tj)	-40 to +150°C	
Température pour le soudage, 1.6mm du boitier pendant 10s(TL)	260°C	300°C
Resistance thermique boitier de jonction (RthJC)	0.33°C/W	Max 0.446°C/W
Resistance thermique diode de jonction (RthJCD)		Max 1.25 °C/W
Resistance thermique Jonction Ambiante (RthJA)	40°C/W	40°C/W
Courant Diode If		20A
Courant Max		100A

Caractéristiques statique

IGW60T120

Electrical Characteristic, at $T_j = 25^\circ\text{C}$, unless otherwise specified

Parameter	Symbol	Conditions	Value			Unit
			min.	typ.	max.	
Static Characteristic						
Collector-emitter breakdown voltage	$V_{(BR)CES}$	$V_{GE}=0V, I_C=3.0mA$	1200	-	-	V
Collector-emitter saturation voltage	$V_{CE(sat)}$	$V_{GE} = 15V, I_C=60A$ $T_j=25^\circ\text{C}$ $T_j=125^\circ\text{C}$ $T_j=150^\circ\text{C}$	-	1.9 2.1 2.3	2.4 -	
Gate-emitter threshold voltage	$V_{GE(th)}$	$I_C=2.0mA, V_{CE}=V_{GE}$	5.0	5.8	6.5	
Zero gate voltage collector current	I_{CES}	$V_{CE}=1200V,$ $V_{GE}=0V$ $T_j=25^\circ\text{C}$ $T_j=150^\circ\text{C}$	-	-	0.6 6.0	mA
Gate-emitter leakage current	I_{GES}	$V_{CE}=0V, V_{GE}=20V$	-	-	600	nA
Transconductance	g_{fs}	$V_{CE}=20V, I_C=60A$	-	30	-	S
Integrated gate resistor	R_{Gint}			4		Ω

IGW40N60F

Symbol	Parameter	Test Conditions	Rating			Units
			Min	Typ.	Max.	
OFF Characteristics						
$V_{(BR)CES}$	Collector-Emitter Breakdown Voltage	$V_{GE}=0V, I_{CE}=250\mu A$	600	--	--	V
I_{CES}	Collector-Emitter Leakage Current	$V_{GE}=0V, V_{CE}=600V$	--	--	1.0	mA
$I_{GES(F)}$	Gate to Emitter Forward Leakage	$V_{GE}=+20V$	--	--	+250	nA
$I_{GES(R)}$	Gate to Source Reverse Leakage	$V_{GE}=-20V$	--	--	-250	nA
ON Characteristics						
$V_{CE(sat)}$	Collector-Emitter Saturation Voltage	$I_C=40A, V_{GE}=15V$	--	2.2	2.7	V
$V_{GE(th)}$	Gate Threshold Voltage	$I_C=1mA, V_{CE}=V_{GE}$	3.5	5.0	6.5	V
Pulse width $t_p \leq 380\mu s, \delta \leq 2\%$						

Caractéristiques dynamique

IGW60T120

Dynamic Characteristic

Input capacitance	C_{iss}	$V_{CE}=25V,$ $V_{GE}=0V,$ $f=1MHz$	-	3700	-	pF
Output capacitance	C_{oss}		-	180	-	
Reverse transfer capacitance	C_{riss}		-	150	-	
Gate charge	Q_{gate}	$V_{CC}=960V, I_C=60A$ $V_{GE}=15V$	-	280	-	nC
Internal emitter inductance measured 5mm (0.197 in.) from case	L_E		-	13	-	nH
Short circuit collector current ¹⁾	$I_{C(SC)}$	$V_{GE}=15V, t_{SC} \leq 10\mu s$ $V_{CC} = 600V,$ $T_j = 25^\circ C$	-	300	-	A

IGW40N60F

Dynamic Characteristics						
C_{ies}	Input Capacitance	$V_{CE}=30V, V_{GE}=0V$ $f=1MHz$	--	1830	--	pF
C_{oes}	Output Capacitance		--	169	--	
C_{res}	Reverse Transfer Capacitance		--	47	--	

Caractéristiques de commutation du IGBT (charge inductive)

IGW60T120

T_j=25°C

Switching Characteristic, Inductive Load, at $T_j=25^\circ\text{C}$

Parameter	Symbol	Conditions	Value			Unit
			min.	typ.	max.	
IGBT Characteristic						
Turn-on delay time	$t_{d(on)}$	$T_j=25^\circ\text{C}$, $V_{CC}=600\text{V}$, $I_C=60\text{A}$, $V_{GE}=0/15\text{V}$, $R_G=10\Omega$, $L_{\sigma^{(2)}}=180\text{nH}$, $C_{\sigma^{(2)}}=39\text{pF}$ Energy losses include "tail" and diode reverse recovery.	-	50	-	ns
Rise time	t_r		-	44	-	
Turn-off delay time	$t_{d(off)}$		-	480	-	
Fall time	t_f		-	80	-	
Turn-on energy	E_{on}		-	4.3	-	mJ
Turn-off energy	E_{off}		-	5.2	-	
Total switching energy	E_{ts}		-	9.5	-	

$T_j=150^\circ\text{C}$

Switching Characteristic, Inductive Load, at $T_j=150^\circ\text{C}$

Parameter	Symbol	Conditions	Value			Unit
			min.	typ.	max.	
IGBT Characteristic						
Turn-on delay time	$t_{d(on)}$	$T_j=150^\circ\text{C}$ $V_{CC}=600\text{V}$, $I_C=60\text{A}$, $V_{GE}=0/15\text{V}$, $R_G=10\Omega$, $L_{\sigma^{(2)}}=180\text{nH}$, $C_{\sigma^{(2)}}=39\text{pF}$ Energy losses include "tail" and diode reverse recovery.	-	50	-	ns
Rise time	t_r		-	45	-	
Turn-off delay time	$t_{d(off)}$		-	600	-	
Fall time	t_f		-	130	-	
Turn-on energy	E_{on}		-	6.4	-	mJ
Turn-off energy	E_{off}		-	9.4	-	
Total switching energy	E_{ts}		-	15.8	-	

IGW40N60F

Switching Characteristics						
$t_{d(on)}$	Turn-on Delay Time	$V_{CE}=400\text{V}$, $I_C=40\text{A}$, $R_G=10\Omega$, $V_{GE}=15\text{V}$, Inductive Load, $T_a=25^\circ\text{C}$,	--	37	--	ns
t_r	Rise Time		--	46	--	
$t_{d(off)}$	Turn-Off Delay Time		--	130	--	
t_f	Fall Time		--	30	--	
E_{on}	Turn-On Switching Loss		--	2.1	--	mJ
E_{off}	Turn-Off Switching Loss		--	0.53	--	
E_{ts}	Total Switching Loss		--	2.63	--	
Q_g	Total Gate Charge	$V_{CE}=400\text{V}$, $I_C=40\text{A}$, $V_{GE}=15\text{V}$,	--	94	--	nC
Q_{ge}	Gate to Emitter Charge		--	18	--	
Q_{gc}	Gate to Collector Charge		--	46	--	

Caractéristiques de commutations des diodes (charge inductive)

IGW40N60F

Electrical Characteristics of the Diode						
V_F	Diode Forward Voltage	$I_F=20A$	--	1.8	2.6	V
T_{rr}	Reverse Recovery Time	$I_F=20A$ $di/dt=200A/\mu S$	--	80	--	ns
I_{rr}	Diode Peak Reverse Recovery Current		--	6	--	A
Q_{rr}	Reverse Recovery Charge		--	240	--	nC

L'objectif de cette première itération était d'étudier les caractéristiques des transistors IGBT. En plus de cela, j'ai réalisé la comparaison avec des marques différentes (STMicroelectronics et Infineo). Il fallait aussi comprendre les informations présentes dans les datasheets et expliquer les significations des différentes résistances et éléments qui influent sur le rendement d'un appareil de conversion d'énergie.