

Application Note AN-7004

Revision:	00
Issue Date:	2007-10-31
Prepared by:	Markus Hermwille

Key Words: IGBT driver, calculation, gate charge, power, gate current
www.Semikron.com/Application/DriverCalculation

IGBTドライバーの算定方法

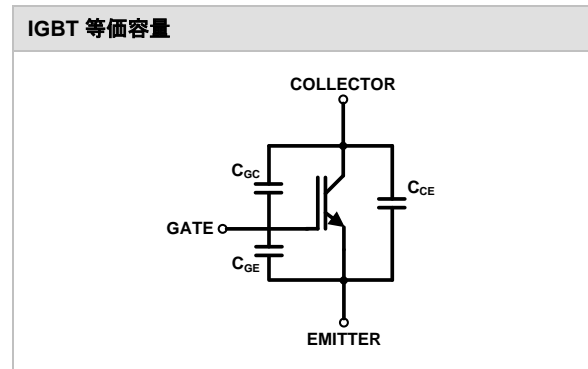
概要	1
ゲート充電電荷特性	1
ゲート充電電荷の測定	3
ゲート充電電荷の決定	3
ゲート出力電力	5
ゲート電流	5
ピークゲート電流	6
IGBTドライバーの選定	6
DriverSel - 容易な IGBTドライバー選定方法	6
使用されている記号及び用語	7
参考文献	8

本アプリケーションノートは IGBT のスイッチングにおけるドライバー出力の決定に関する内容を記載しております。本アプリケーションノートに記載されている情報は参考であり、完全な設計ルールではありません。実際の設計はユーザーの責任において行ってください。

IGBT ドライブ回路における必要となる出力を計算する際には、ゲート充電電荷が重要なパラメータとなります。このゲート充電電荷は入力容量 C_{GC} 及び C_{GE} によって決まります。

概要

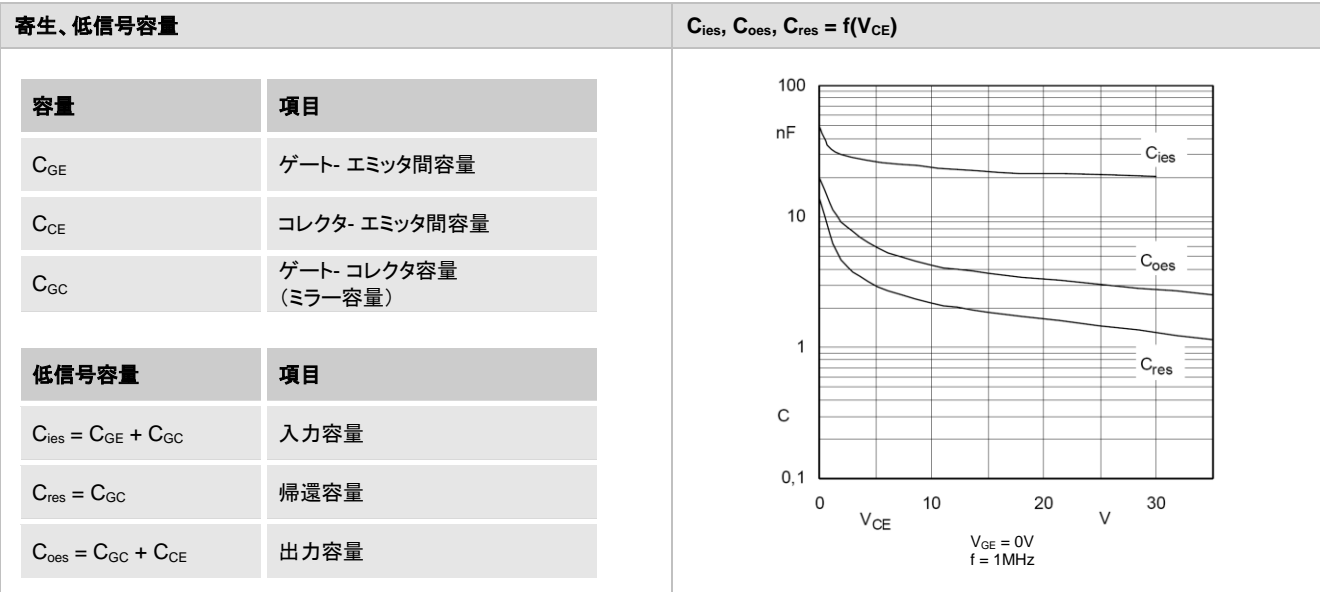
あらゆるパワーエレクトロニクスシステムにおいて 1 つの重要な要素はパワーモジュール以外に、トランジスタとコントローラー間の重要なインターフェースとなる IGBT ドライバーです。このため、ドライバーの選択及びドライバー出力電力を正確に計算することによって、コンバータシステムのソリューションにて信頼性の向上へとつながります。不十分なドライブ電力や誤ったドライバーの選択はモジュールやドライバーの不具合の原因となります。



ゲート充電電荷特性

IGBT モジュールのスイッチング特性(オン・オフ)は内部容量(充電電荷)及び内外ゲート抵抗によって決まります。

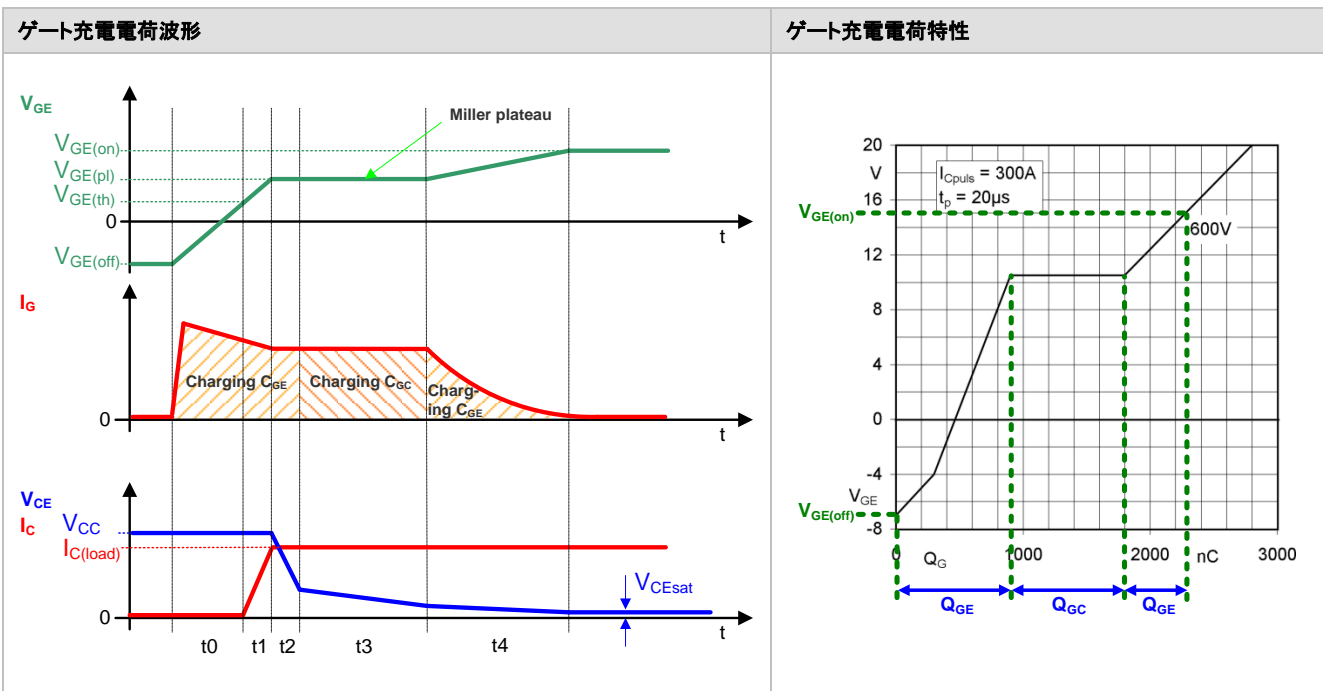
下記の表に各容量の名称を記載します。IGBT のデータシートにはこれらの容量はオフ状態の電圧に依存した低信号容量として挙げられています。容量は温度には依存しませんが、以下に示すカーブの様にコレクタ-エミッタ間電圧に依存します。コレクタ-エミッタ間電圧が低いときに実質的に、この依存が大きくなります。



以下の図に IGBT ターンオン時における単純化したゲート充電波形 $V_{GE}=f(t)$ 、 $I_G=f(t)$ 、 $V_{CE}=f(t)$ 及び $I_C=f(t)$ を示します。ターンオンは 3 つの段階に分けられます。IGBT が十分に飽和するまでにゲート-コレクタ間容量の充電、ゲート-エミッタ間容量の充電、そして再度のゲート-エミッタ間容量の充電があります。

スイッチング特性及びドライバーを算定するために、入力容量が適用されます。ドライバー出力を決定する実用的な方法

として、データシートに記載されているゲート充電電荷特性を用いる方法があります。この特性はゲート充電電荷 Q_G とゲート-エミッタ間電圧 V_{GE} の関係が示されています。ゲート充電電荷は IGBT モジュールの電流定格により増加します。また、ゲート充電電荷はより小さい程度であっても、DC リンク電圧に依存します。高い動作電圧においては、ミラー容量の大きな影響によりゲート充電電荷が増加します。殆どのアプリケーションにおいて、この影響は無視できます。



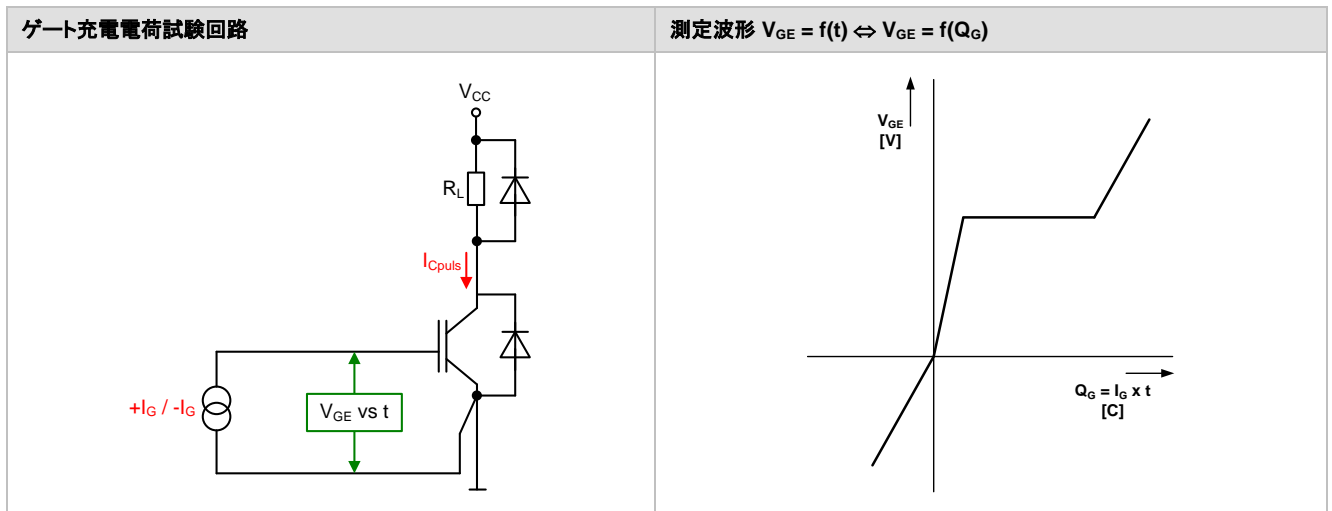
スイッチング時間 t_0 : ゲート電流 I_G が入力容量 C_{GE} を充電し、ゲート-エミッタ間電圧 V_{GE} が $V_{GE(th)}$ まで上昇します。ゲート抵抗に依存し、数アンペアがこの状態で流れます。 V_{GE} が $V_{GE(th)}$ を下回っているため、この間はコレクタ電流は流れず、 V_{CE} は V_{CC} レベルに維持されています。

- スイッチング時間 t1: V_{GE} が $V_{GE(th)}$ を超えると、IGBTはターンオンを開始します。 I_C は理想還流ダイオードの場合、最大負荷電流 $I_{C(load)}$ まで上昇を開始します(単純波形を示します)。実際の還流ダイオードでは、 I_C は $I_{C(load)}$ を超過します。これは $I_{C(load)}$ に付加される逆回復電流によるものです。還流ダイオードにt2の初めまで電流が流れているため、コレクタ-エミッタ間電圧 V_{CE} は下がりません。 V_{GE} は電圧 $V_{GE(pl)}$ に到達します。
- スイッチング時間 t2: V_{GE} は $V_{GE(pl)}$ に維持されます。還流ダイオードがオフすると、 V_{CE} が急速に下がります dv_{CE}/dt が大きくなります。
- スイッチング時間 t3: V_{CE} がオン状態の V_{CEsat} まで降下する間、ミラー容量 C_{GC} が上昇し、 I_G により充電されます。 V_{GE} は平坦で、 $V_{GE(pl)}$ レベルに維持されます。
- スイッチング時間 t4: t4の初めにおいて、IGBTが完全にオンします。 C_{GE} の充電電荷により V_{GE} は指数関数状に上昇します。 I_G は指数関数状に降下し、 V_{CE} は V_{CEsat} レベルに到達します。
- ターンオフ時は、上記とは逆の順序の現象になります。ゲートから電荷が除去される必要があります。

ゲート充電電荷の測定

ゲート充電電荷の測定に用いられる単純な試験回路を以下に示します。ゲートは定電流により供給されます。さらにパルスコレクタ定電流が印加されます。一定のゲート電流による $Q_G = I_G \times t$ により測定波形 $V_{GE} = f(t)$ と $V_{GE} = f(Q_G)$ は等価

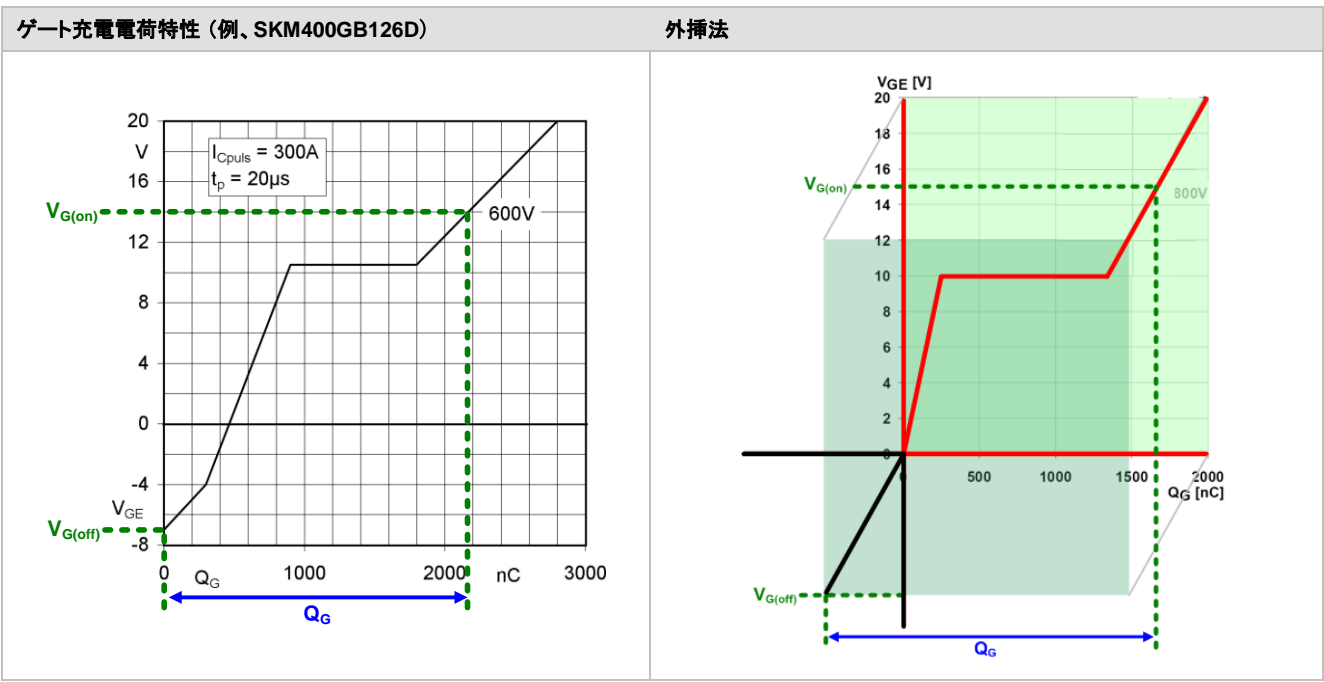
になります。ゲート充電電荷試験方法は、IEC60747-9, Ed.2: Semiconductor Devices – Discrete Devices – Insulated-Gate Bipolar Transistor (IGBTs) に記述されています。



ゲート充電電荷の決定

IGBTドライブに必要なパルスでのゲート充電電荷は、ゲート充電電荷特性曲線を用いて算定します。これはゲート充電中のゲート-エミッタ間電圧を示しています。ゲート充電電荷はゲート電圧の大きさ、即ちターンオンゲート電圧 $V_{G(on)}$ からターンオフゲート電圧 $V_{G(off)}$ までが考慮されています。SEMIKRON IGBT のデータシートには、正領域から負領域

までのゲート充電電荷特性が掲載されています。ゲート充電電荷特性が正領域のみの場合、ゲート充電電荷の値は以下に示す図の様に外挿して読み取ることが出来ます。図の緑色の領域が IGBT データシートに掲載されています。鮮緑色のゲート充電電荷と平行になるように、負領域の $V_{G(off)}$ まで補正して、曲線により算定します。



他にゲート充電電荷を算定する方法では入力容量 C_{ies} と特殊定数要素をゲート充電電荷特性の代わりに使用します。 C_{ies} の値はデータシートに記載されています。

1 パルス当たりの必要なゲート充電電荷または充電エネルギーは、タイミングよく得られなければなりません。これはドライ

バーの出力段において、低インピーダンス及び低インダクタンスの出力容量の場合にのみ実現します。容量の大きさは計算値 Q_G により求められます。ゲート充電電荷はドライバー出力電力及びゲート電流を算定するために用いられる基本パラメータです。

C_{ies} を用いたゲート充電電荷の算定方法

ゲート充電電荷は次式となります。

$$Q_G = C_G \times (V_{G(on)} - V_{G(off)})$$

ここで $C_G = k_C \times C_{ies}$ となります。

ゲート容量定数 k_C はおよそ次式となります。

$$k_C = \frac{Q_{G(ds)}}{C_{ies} \times (V_{G(on)} - V_{G(off)})}$$

ここで $Q_{G(ds)}$ は IGBT のデータシートに記載されている値、 $V_{G(on)}$ 及び $V_{G(off)}$ は $Q_{G(ds)}$ に適用されるゲート電圧です。

それゆえ、ゲート電荷は次式となります。

$$Q_G = k_C \times C_{ies} \times (V_{G(on)} - V_{G(off)})$$

注意:

この方法は厳密には正確ではなく、ゲート充電電荷特性が存在しない時に限り使用されています。

ゲート出力電力

個々の IGBT のドライブに必要な電源容量は、IGBT のスイッチング周波数及びゲートの充放電に関する電力から求めら

れます。

チャンネルあたりのドライブ出力電力の算定

電力は次式となります

$$P_{GD(out)} = E \times f_{sw}$$

$E = Q_G \times (V_{G(on)} - V_{G(off)})$ を代入して、1チャンネルあたりのドライブ出力は以下のとおりになります。

$$P_{GD(out)} = Q_G \times (V_{G(on)} - V_{G(off)}) \times f_{sw}$$

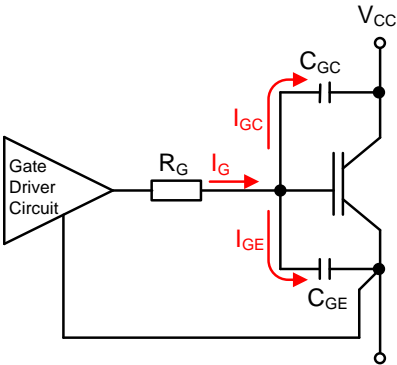
C_{ies} を用いたドライバー電力の概算は以下のとおりになります。

$$P_{GD(out)} = k_C \times C_{ies} \times (V_{G(on)} - V_{G(off)})^2 \times f_{sw}$$

ゲート電流

IGBT ドライバー回路における必要条件の 1 つは、IGBT をオンオフ時に IGBT の入力容量を充放電するための十分な

電流が供給されることです。ゲート電流は IGBT の入力容量を充電するための式を使って計算できます。

IGBT 容量	ゲート電流算出
	<p>充電電荷は次式となります。</p> $Q_G = \int idt$ $Q_{GE} = i_{GE} \times t_{sw}, Q_{GC} = i_{GC} \times t_{sw}$ <p>全ゲート充電電荷時は以下のとおりになります。</p> $Q_G = Q_{GE} + Q_{GC} = (i_{GE} + i_{GC}) \times t_{sw}$ <p>ここで、 $t = \frac{1}{f_{sw}}$ となります。</p> <p>平均ゲート電流は以下の式で表されます。</p> $I_G = I_{GE} + I_{GC} = Q_G \times f_{sw}$ <p>C_{ies} を用いた平均ゲート電流の概算は以下のとおりになります。</p> $I_G = k_C \times C_{ies} \times (V_{G(on)} - V_{G(off)}) \times f_{sw}$

ピークゲート電流

IGBT のスイッチング時間は IGBT のゲート充放電により制御されます。ピークゲート電流が増加すると、ターンオン及びターンオフ時間が短くなり、スイッチング損失が低減します。これは明らかにスパイク電圧の様な注視しなければならないスイッチングパラメータに影響を与えます。ゲート充電電流はゲート抵抗 $R_{G(on)}$ 及び $R_{G(off)}$ により制御できます。理論的な

ピーク電流 I_{GPEAK} は以下の式で計算できます。IGBT モジュールの内部ゲート抵抗 $R_{G(int)}$ はピークゲート電流を計算するときに考慮されなければなりません。実際は、浮遊インダクタンスにより、ピーク値が以下に示す理論値よりも低くなります。

ピークゲート電流	計算
	<p>ピーク電流は次式となります。</p> $I_{GPEAK} = \frac{V_{G(on)} - V_{G(off)}}{R_G + R_{G(int)}}$

IGBT ドライバーのデータシートに、ゲート抵抗の最小値に対応する最大ピーク電流が規定されています。この最大定格と

最小定格を超えた場合、ゲートドライバ出力が破損する可能性があります。

IGBT ドライバーの選定

アプリケーションにおいて最適な IGBT ドライバーを選定する際、以下の事項を考慮する必要があります。

- ドライバーは十分なゲート電流（入出力電流/入出力電力）を供給できなければなりません。ドライバーの最大平均出力電流は計算値より大きくなければなりません。
- ドライバーの最大ピークゲート電流は計算値と同等、もしくはそれより大きな値でなければなりません。
- ドライバーの出力容量は IGBT のゲートを充放電させるためのゲート充電電荷を供給できなければなりません。SEMIKRON ドライバーのデータシートでは 1 パルス当たりの最大充電電荷が記載されています。

その他、IGBT ドライバーの選定の際に必要なパラメータは絶縁耐圧及び dv/dt 耐量です。

DriverSel – 容易な IGBT ドライバー選定方法

DriverSel はアプリケーションにかかわらず、IGBT ドライバーの計算及び最適なドライバーの選定を容易にします。このソフトウェアツールは前述の特性や数式を考慮し、選定された IGBT モジュール、並列接続数、ゲート抵抗、スイッチング周波数、コレクタ-エミッタ間電圧を基に、最適な IGBT ドライバーを選定します。このツールはあらゆるメーカー、パッケージの IGBT に対応するドライバーの計算及び選定に使用され、必要なゲート充電電荷及び平均ゲート電流を計算します。

Link: DriverSel はフリーソフトウェアです。セミクロンのホームページ <http://semisel.semikron.com/DriverSelectTool.asp> をご覧ください。

DriverSel 画面(例)

Driver Select Tool

Preselect

Product

Device

Number of IGBT Modules

Switching Frequency fsw kHz

Applied Gate Resistor Ohm

Update

Result

Driver Channels 2

Collector Emitter Voltage 1200 V

Required Average Current 28,4 mA

Gate Charge 2,84 μ C (2 Modules in parallel)

Driver

Driver	$I_{out(av)}$ /mA	\hat{I}_{out} /A	V_{isol} /kV	$V_{ce max}$ /V	R_{gmin} / Ω	Channels
1x SKYPER 32 or SKYPER 32PRO ¹⁾	50	15	4	1200	1,5	2
1x SKHI24	80	15	4	1200	1,5	2
1x SKHI23/12	50	8	2,5	1200	2,7	2

*1) :SKYPER 32 with external boost capacitors

使用されている記号及び用語

記号	用語
C_{CE}	コレクタ・エミッタ間容量
C_G	ゲート容量
C_{GC}	ゲート・コレクタ間容量
C_{GE}	ゲート・エミッタ間容量
C_{ies}	IGBT 入力容量
C_{oes}	IGBT 出力容量
C_{res}	IGBT 帰還容量
dv_{CE}/dt	コレクタ・エミッタ間電圧上昇率及び下降率
E	電気エネルギー
f_{sw}	スイッチング周波数
I_C	コレクタ電流
I_{Cpuls}	パルスコレクタ定電流
I_G	ゲート電流
I_{GM}	ピークゲート電流
I_{outAVG}	ドライバー平均出力電流
k_C	ゲート容量定数
$P_{GD(out)}$	ドライバー出力電力
Q_G	ゲート充電電荷
Q_{GC}	ゲート・コレクタ間充電電荷
Q_{GE}	ゲート・エミッタ間充電電荷
R_G	ゲート抵抗
$R_{G(int)}$	IGBT モジュール内部ゲート抵抗

$R_{G(off)}$	ターンオフゲート抵抗
$R_{G(on)}$	ターンオンゲート抵抗
t	時間
t_{sw}	スイッチング時間
V_{CC}	コレクタ・エミッタ間供給電圧
V_{CE}	コレクタ・エミッタ間電圧
V_{CEsat}	コレクタ・エミッタ間飽和電圧
V_G	ゲート電圧(ドライバー出力)
$V_{G(off)}$	ターンオフゲート電圧(ドライバー出力)
$V_{G(on)}$	ターンオンゲート電圧(ドライバー出力)
V_{GE}	ゲート・エミッタ間電圧
$V_{GE(pl)}$	スイッチング時平坦ゲート・エミッタ間電圧
$V_{GE(th)}$	ゲート・エミッタ間遮断電圧

参考文献

- [1] www.SEMIKRON.com
- [2] Application Manual Power Modules, SEMIKRON International
- [3] M. Hermwille, "Plug and Play IGBT Driver Cores for Converters", Power Electronics Europe Issue 2, pp. 10-12, 2006
- [4] M. Hermwille, "Gate Resistor – Principle and Application", Application Note AN-7003, SEMIKRON
- [5] P. Bhosale, M. Hermwille, "Connection of Gate Drivers to IGBT and Controller", Application Note AN-7002, SEMIKRON
- [6] IEC 60747-9, Ed.2: Semiconductor Devices – Discrete Devices – Part 9: Insulated-Gate Bipolar Transistors (IGBTs)

免責事項

セмикロンは信頼性、機能や設計改善の為、予告なしに本資料を変更する権利を有します。本資料で提供される情報は正確で信頼出来るものです。しかしながら、保証するものではなく、情報の正確さや使用に関し責任を負いません。セмикロンはアプリケーション、又は本資料中の製品や回路から生じる責任を負いません。さらに、この技術資料は素子の特性を保証するものではありません。納入、性能や適合性について保証、又は意味するものではありません。本資料は以前に提供された情報の全てに優先し、置換えます。又、予告なしに更新する事があります。

セмикロン製品の生命維持装置及びシステムへの使用は、セмикロンの承認文書なしでは認可されません。