

第3章 サージ電圧保護(主回路)

1. サージ電圧の発生要因と抑制方法	3-2
2. スナバ回路の種類と特徴	3-4
3. 放電阻止型RCDスナバ回路の設計方法	3-6
4. アクティブクランプ回路	3-8

IGBTとFWDは電流遮断時にサージ電圧が発生し、過電圧で素子が破壊する可能性があります。本章ではサージ電圧保護について説明します。

1. サージ電圧の発生要因と抑制方法

1相分のインバータ回路を図3-1に示します。サージ電圧は、IGBTがオフする際の主回路電流の急激な変化によって主回路の配線インダクタンス L_s に電圧が誘起され発生します。一般的なIGBT1のターンオフ波形とFWD2の逆回復波形を図3-2に示します。このサージ電圧が V_{CES} を越えると過電圧になり破壊する可能性があります。

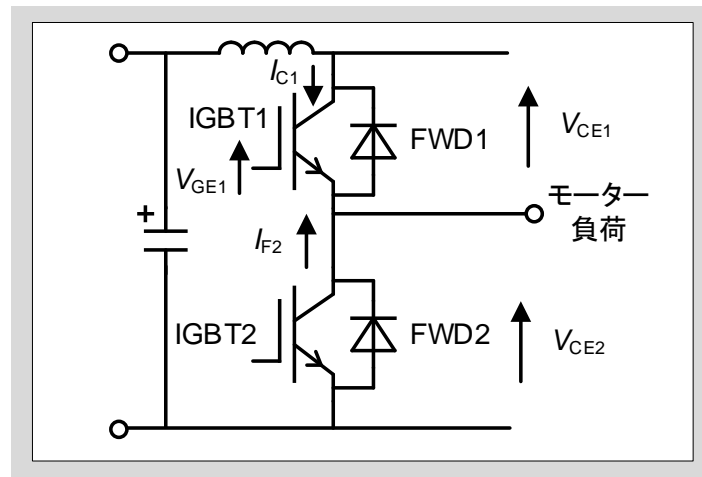


図3-1 1相分インバータ回路

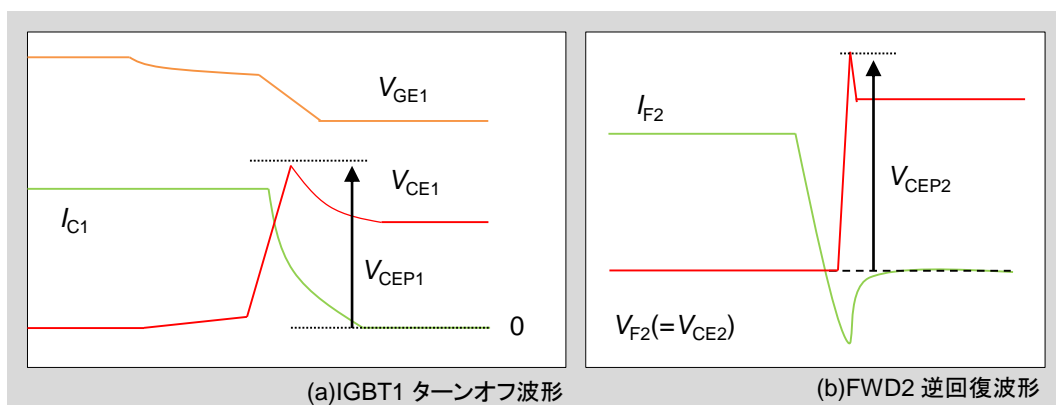


図3-2 IGBT1のターンオフ波形とFWD2の逆回復波形

<サージ電圧抑制方法>

下記にサージ電圧の抑制方法を示します。

(a) スナバ回路の配置

スナバ回路は、配線インダクタンスの影響を小さくするために端子直近に配置してください。

(b) IGBTドライブ回路の逆バイアス電圧($-V_{GE}$)やゲート抵抗(R_G)の調整

$-V_{GE}$ を小さくすることや R_G を大きくすることで電流遮断時の di/dt を小さくし、サージ電圧を抑制できます。
(詳細は第4章ドライブ回路設計を参照して下さい)

(c) 電解コンデンサとディスクリートIGBT端子間距離の短縮

電解コンデンサとディスクリートIGBT端子間の距離を短くすることで配線インダクタンスを低減し、サージ電圧を抑制できます。低インピーダンスのコンデンサを用いるとさらに効果的です。

(d) 主回路配線の調整

インダクタンスを低減するために配線を太く・短くすることでサージ電圧を抑制できます。また、平行平板配線(ラミネート配線)の使用は大変効果的です。

(e) アクティブクランプ回路の適用

ゲート駆動回路にアクティブクランプ回路を適用することで、配置したツェナーダイオードの降伏電圧と概ね等しいサージ電圧に抑制することができます。

2.スナバ回路の種類と特徴

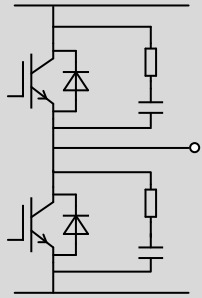
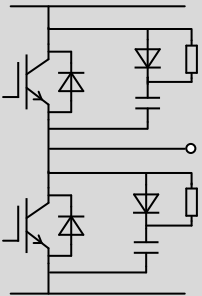
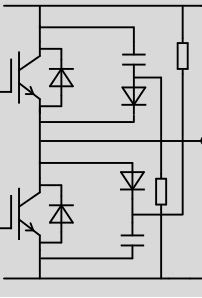
スナバ回路には、各アームに付ける個別スナバ回路と直流母線間に付ける一括スナバ回路があります。簡素化の目的で一括スナバ回路の使用が一般的です。

<個別スナバ回路>

個別スナバ回路の代表的な例として、下記のスナバ回路があります。

- a. RCスナバ回路 b. 充放電型RCDスナバ回路 c. 放電阻止型RCDスナバ回路

表3-1 個別スナバ回路の接続図と特徴

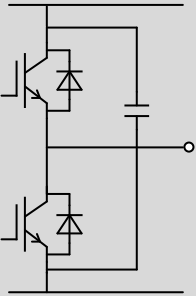
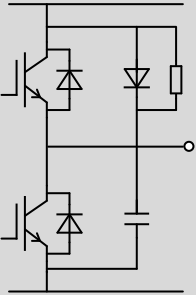
スナバ回路接続図	特徴(注意事項)
<p>a.RCスナバ回路</p> 	<ul style="list-style-type: none"> 一括スナバ回路に比べサージ電圧抑制効果大きい。 大容量のIGBTに適用する際には、スナバ抵抗を低い値にする必要があり、この結果ターンオン時のi_cが増大しIGBTの負担が大きくなる。
<p>b.充放電型RCDスナバ回路</p> 	<ul style="list-style-type: none"> サージ電圧抑制効果あり。 RCスナバ回路と異なり、スナバダイオードが追加されているのでスナバ抵抗値を大きくでき、ターンオン時のIGBTの負担を考えなくてよい。 スナバ抵抗における発生損失は下式で求められる。 $P = \frac{L \cdot I_o^2 \cdot f}{2} + \frac{C_s \cdot E_d^2 \cdot f}{2}$ <p> L : 主回路の配線インダクタンス I_o : IGBTのターンオフ時I_c C_s : スナバコンデンサ容量 E_d : 直流電源電圧 f : スイッチング周波数 </p>
<p>c.放電阻止型RCDスナバ回路</p> 	<ul style="list-style-type: none"> サージ電圧抑制効果あり。 スナバ回路での発生損失が少ない。 スナバ抵抗における発生損失は下式で求められる。 $P = \frac{L \cdot I_o^2 \cdot f}{2}$ <p> L : 主回路の配線インダクタンス I_o : IGBTのターンオフ時I_c f : スイッチング周波数 </p>

<一括スナバ回路>

一括スナバ回路の代表的な例として、下記のスナバ回路があります。

- a. Cスナバ回路 b. RCDスナバ回路

表3-2 一括スナバ回路の接続図と特徴

スナバ回路接続図	特徴(注意事項)
<p>a.Cスナバ回路</p>  <p>The diagram shows a half-bridge with two IGBTs and two diodes. A capacitor is connected in parallel with the diode of the upper IGBT. The output terminal is shown on the right.</p>	<ul style="list-style-type: none"> •最も簡易的な回路。 •主回路インダクタンスとスナバコンデンサのLC共振回路で電圧が振動しやすい。
<p>b.RCDスナバ回路</p>  <p>The diagram shows a half-bridge with two IGBTs and two diodes. A snubber circuit consisting of a diode and a resistor in series is connected in parallel with the diode of the upper IGBT. A capacitor is connected in parallel with the diode of the lower IGBT. The output terminal is shown on the right.</p>	<ul style="list-style-type: none"> •スナバダイオードの選定を誤ると高いサージ電圧が発生し、スナバダイオードの逆回復時に電圧が振動することがある。

3. 放電阻止型RCDスナバ回路の設計方法

放電阻止型RCDスナバ回路の基本的な設計方法について説明します。

<適用可否の検討>

図3-3に放電阻止型RCDスナバ回路を適用したターンオフ時の動作軌跡を示し、図3-4にターンオフ時の電流・電圧波形を示します。このスナバ回路はC-E間電圧が直流電源電圧を超えてから動作し、その理想的な動作軌跡は図中の点線です。しかし実際の装置では、スナバ回路の配線インダクタンスやスナバダイオード過渡順電圧降下によるターンオフ時のサージ電圧が存在するため、図3-3の実線のように膨らみます。このスナバ回路適用には、ターンオフ時の動作軌跡がIGBTのRBSOA内に収まる必要があります。

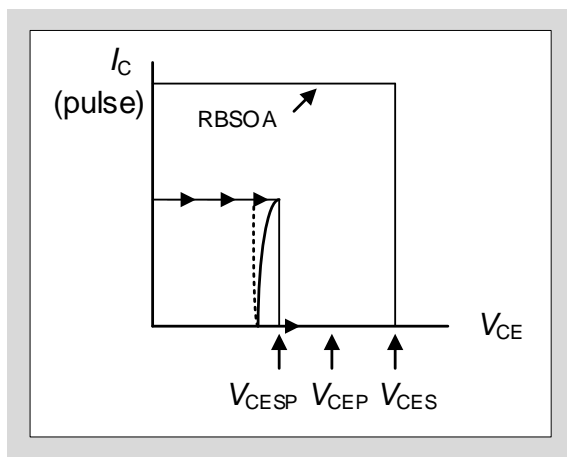


図3-3 ターンオフ時の動作軌跡

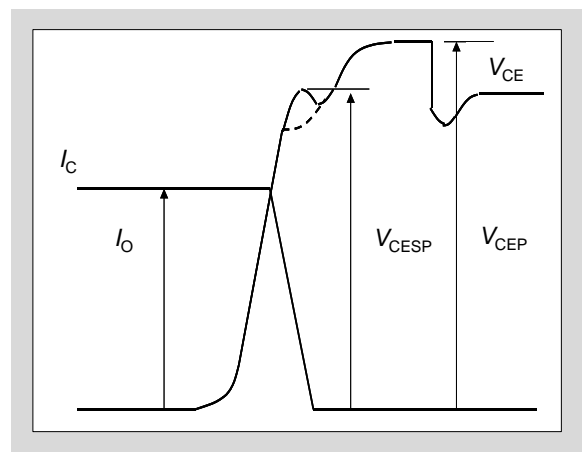


図3-4 ターンオフ時の電流・電圧波形

なお、ターンオフ時のサージ電圧は次式で求めることができます。

$$V_{CESP} = E_d + V_{FM} + \left(-L_s \frac{di_c}{dt}\right) \dots\dots\dots ②$$

- E_d : 直流電源電圧
- V_{FM} : スナバダイオード過渡順電圧降下
- L_s : スナバ回路の配線インダクタンス
- di_c/dt : ターンオフ時の i_c 変化率の最大値

スナバダイオードの一般的な過渡順電圧降下の参考値は下記の通りです。

600Vクラス: 20~30V、1200Vクラス: 40~60V

<スナバコンデンサ(C_s)容量値の求め方>

スナバコンデンサに必要な容量値は次式で求めることができます。

$$C_s = \frac{L \cdot I_o^2}{(V_{CEP} - E_d)^2} \dots\dots\dots ③$$

- L : 主回路の配線インダクタンス
- I_o : IGBTのターンオフ時 i_c
- V_{CEP} : スナバコンデンサ電圧の最終到達値
- E_d : 直流電源電圧

V_{CEP} はC-E間耐圧以下に抑える必要があります。また、スナバコンデンサには高周波特性の良いもの(フィルムコンデンサ等)を選んでください。

<スナバ抵抗(R_S)値の求め方>

スナバ抵抗に要求される機能はIGBTが次のターンオフ動作を行うまでにスナバコンデンサの蓄積電荷を放電する事です。IGBTが次のターンオフ動作を行うまでに蓄積電荷の90%を放電する条件でスナバ抵抗の値を求めると次式のようにになります。

$$R_S \leq \frac{1}{2.3 \cdot C_S \cdot f} \quad \dots\dots\dots ④$$

R_S : スナバ抵抗
 C_S : スナバコンデンサ容量
 f : スイッチング周波数

スナバ抵抗値をあまりにも小さい値に設定するとスナバ回路電流が振動し、IGBTのターンオン時の I_C 尖頭値も増えます。④式を満たす範囲内で極力大きい値に設定して下さい。

スナバ抵抗の発生損失 $P_{(R_S)}$ は抵抗値と関係なく次式で求めることができます。

$$P_{(R_S)} = \frac{L \cdot I_O^2 \cdot f}{2} \quad \dots\dots\dots ⑤$$

$P_{(R_S)}$: スナバ抵抗の発生損失
 L : 主回路の配線インダクタンス
 I_O : IGBTのターンオフ時 I_C
 f : スイッチング周波数

<スナバダイオードの選定>

スナバダイオードの過渡順電圧降下は、サージ電圧を増大させる要因の一つになります。また、スナバダイオードの逆回復時間が長いと、高周波スイッチング動作時にスナバダイオードの発生損失が大きくなります。このスナバダイオードの逆回復が急激であると逆回復動作時にC-E間電圧が急激に大きくなり振動します。スナバダイオードは過渡順電圧が低く、逆回復時間が短く、逆回復が緩やかになるスナバダイオードを選んでください。

<スナバ回路配線上の注意事項>

スナバ回路の配線によるインダクタンスはサージ電圧発生要因となるので、回路部品の配置も含めてインダクタンスを低減して下さい。

4. アクティブクランプ回路

主回路インダクタンスの低減・スナバ回路の適用以外のサージ電圧抑制方法としてゲート駆動回路 (GDU) にアクティブクランプ回路を適用する方法があります。図3-5にアクティブクランプ回路の一例を示します。基本的な回路構成は、C-G間にツェナーダイオードと逆通電方向にダイオードを直列接続します。この回路でC-G間にツェナーダイオードの降伏電圧を超える電圧が発生した場合、ツェナーダイオードが降伏します。ツェナーダイオードの降伏電流はIGBTのゲートをオンさせるように流れるため、IGBTのサージ電圧はツェナーダイオードの降伏電圧と概ね等しくなります。図3-6にアクティブクランプ回路適用時の波形例を示します。ターンオフ時のコレクタ電流変化率 di_C/dt はアクティブクランプ回路適用前よりも緩やかになり、ターンオフ時間が長くなります。アクティブクランプ回路の適用は損失増大の要因となるため、各種設計検証を行うことを推奨します。

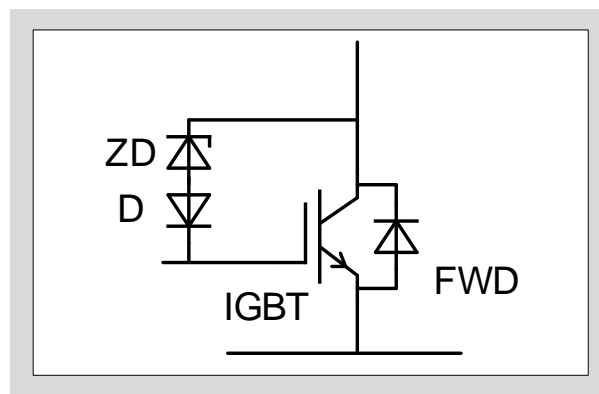


図3-5 アクティブクランプ回路例

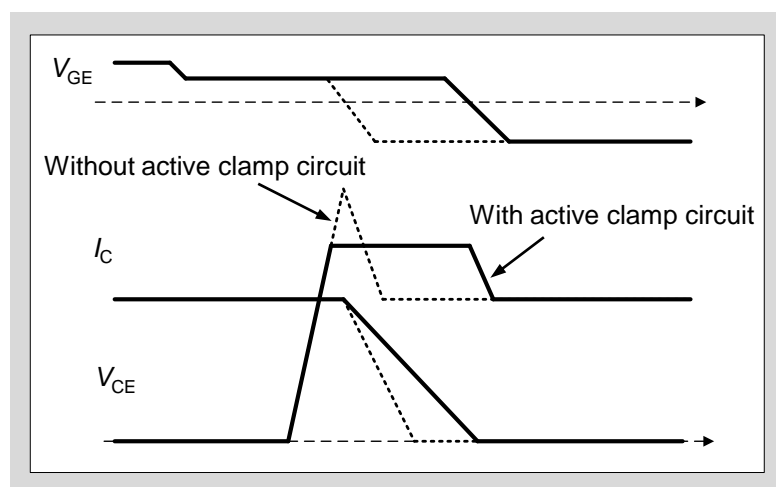


図3-6 アクティブクランプ回路適用時の波形例