

第3章 モータの制御回路設計

本章では、大会での使用条件を考慮したパワー・デバイスの選定方法、そのパワー・デバイスを用いたモータ・コントローラを開発する際に必要となる制御回路等の設計方法について述べる。

3.1 設計方針

いかに効率の良いコントローラでも必ず数%の電氣的ロスがあるため、使用条件さえ合えば、コントローラは使わない方が良い場合もある。まして半導体を使っているため故障の原因にもなり、ボートの重量が重くなるといった欠点もある。しかし、ゴールドンイーグルは競技用ソーラーボートであり、その性能向上のために水中翼を利用している。水中翼船の場合、一定時間内の安定した翼走が必要となるため、モータへの電力を調整するコントローラが必要となる。また、コントローラを搭載することで様々な実験を行うことができる。

現在、耐久レースで使用する電流値（約 20[A]）程度の DC モータ用のコントローラは市販品として販売されているが、ソーラーボートに搭載するには不必要な保護回路等が付いているため重量が重くなるといった問題がある。また、スピードレースでは 150[A]の大電流を使用するが、この大電流を制御できる小型かつ軽量でソーラーボートに適した市販のコントローラはない。

そこで、ソーラーボートの安定した水中翼走と自動航行システムの開発を実現するためにも必要となるモータのコントローラを独自に設計することとした。設計は大会規則を考慮したうえで、耐久、スピードの両レースとも同一のコントローラを使用し、効率が良く、小型かつ軽量で過度な保護回路は付けず、さらにマイコンにより制御できるものとした。

3.2 パワー・デバイスの選定

3.2.1 パワー・デバイスの動向

従来、パワー・エレクトロニクスの分野ではサイリスタ、ダーリントン・パワー・トランジスタを主要デバイスとして電力制御に使用してきた。しかし、最近ではパワー MOS FET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)、SIT (Static Induction Transistor)、IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)、IGBT モジュールの出現により電力制御の高速化が可能となった。^{(11)、(12)}

パワー・エレクトロニクスの分野では MOS 系デバイスが主流を占めている。特に、産業機器のインバータ、FA 用モータ・コントロールの分野では IGBT チップを 2 個、4 個あるいは 6 個を 1 パッケージに封入したモジュール製品が利用され、成長を遂げている。図 3.1 に代表的なパワー・デバイスの電力と周波数の適用範囲を示す。

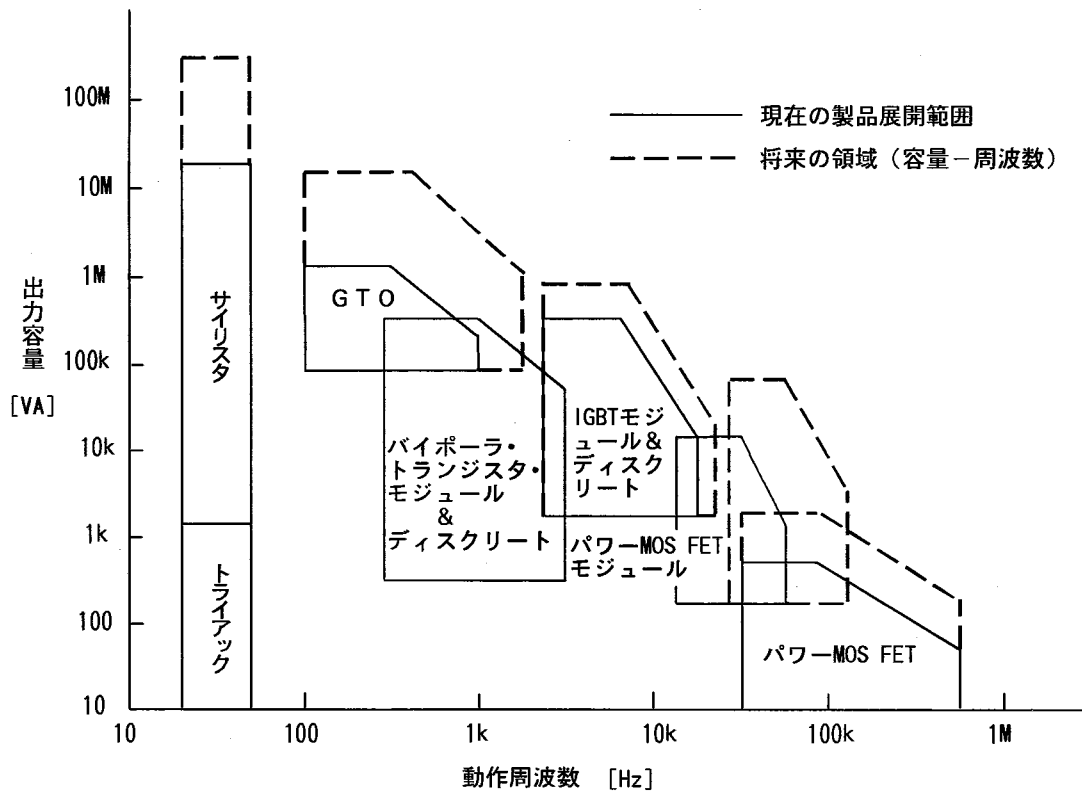


図 3.1 代表的なパワー・デバイスの電力と周波数の適用範囲

パワー・デバイスは低耐圧（200[V]以下）と高耐圧（400[V]以上）の 2 つに分けて技術の発展を考察することができる。

低耐圧デバイスでは、パワー MOS FET を主流としてトレンチ構造などを採用しつつ、更なる微細化が追及される。パワー MOS FET では 60[V]程度のもものでは 500[A]程度のは可能であり、パッケージを含む組み立て技術がより重要になってきている。

高耐圧デバイスにおいては、①ON 電圧の低減、②ON 電圧とスイッチング時間のトレードオフ特性の改善、③熱抵抗の低減など、いくつかの課題を抱えている。

IGBT はパワー MOS FET が不得意とする高耐圧の領域で ON 電圧を低減することで特長を発揮してきた。IGBT の発展は $V_{CE(sat)}$ 対 t_f のトレードオフ特性の改善が目され、微細化技術を活用することで特性を向上させている。

3.2.2 パワー・デバイスの選定

3.1 節で述べたように、スピードレースでは 150[A]もの大電流をモータに供給する。また、モータ駆動時にはバッテリー電圧が 24[V]にもかかわらず、保護回路を用いなければ 200~300[V]の非常に高いサージ電圧が発生する。そのため、パワー・デバイスは高耐圧で大電流を流せるものを選定する必要がある。保護回路については 3.5 節で詳しく述べる。

上記の条件を満たすものとして IGBT が存在するが、耐久、スピードの両レースでコントローラを共有することを考えると、IGBT ではパワー MOS FET に比べて低電

流時における損失電力が非常に大きくなる。そこで、パワー MOS FET を並列接続することで低 ON 抵抗化をはかり、IGBT を用いた場合よりも損失電力を抑えコントローラの高効率化を目指すこととした。図 3.2 はパワー MOS FET と IGBT の負荷電流と損失電力の関係である。パワー MOS FET は日立製作所製の 2SK1522、IGBT は三菱電機製の CM450HA-5F を使用した。なお、IGBT は実際にアメリカ大会のスピードレースで使用したものと同一のものである。

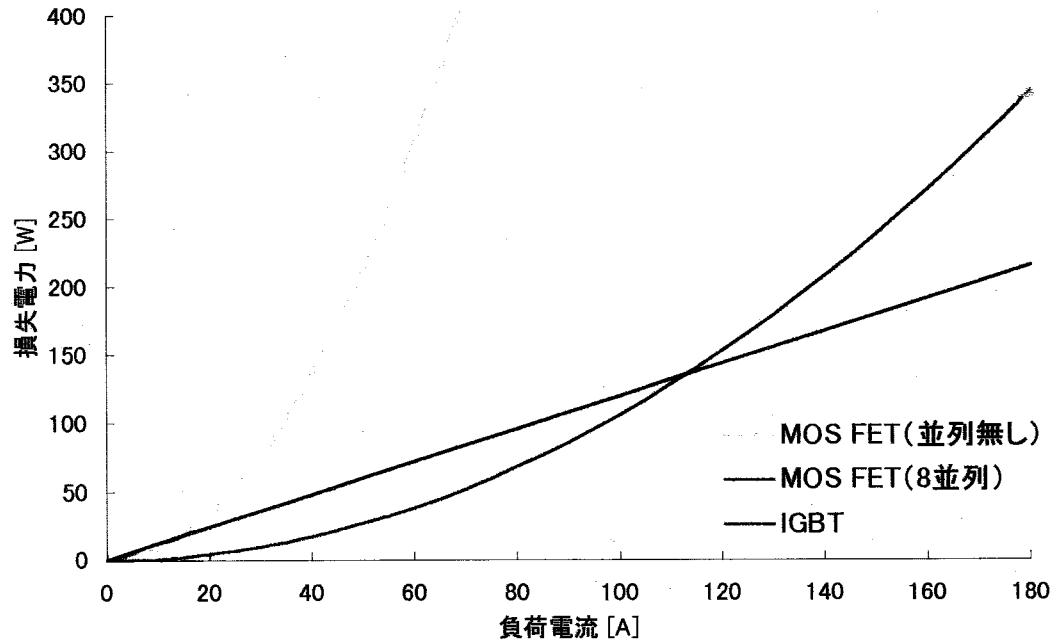


図 3.2 MOS FET と IGBT の負荷電流と損失電力の関係

図 3.2 の損失電力は以下に示す計算式より求めた。

電力損失の計算式

$$P_F = I_D^2 \times R_{DS(ON)} \div n$$

P_F : MOSFETの電力損失 I_D :ドレイン電流 (負荷電流)
 $R_{DS(ON)}$: ON抵抗(0.085Ω) n : MOSFETの並列数

$$P_I = V_{CE(SAT)} \times I_C$$

P_I : IGBTの電力損失 I_C :コレクタ電流 (負荷電流)
 $V_{CE(SAT)}$:コレクタ・エミッタ間飽和電圧 (1.20V)

ただし、この計算式は、スピードレースにおいてコントローラはボートの加速・減速のみを制御し、その時間は短時間であり、さらに定常航行後はリレーによりバイパスするため、スイッチングによる損失は考慮せず、損失電力の算出は定常損失（トランジスタが飽和動作した時の損失）によるものとした。

3.3 パワー MOS FET

3.3.1 パワー MOS FET の選定

本研究で使用したパワー MOS FET について説明する。選定する際に注意したのは、過度に耐圧を上げすぎると電流容量が小さくなったり、ON 抵抗が増加する等の問題である。そこで、MOS FET を並列接続することをも考慮し、日立製作所製の高速度電力スイッチング用シリコン N チャネル MOS FET の 2SK1522 を採用することとした。表 3.1 にその仕様を示す。このパワー MOS FET の外形は基板実装タイプ (TO-3PL) でありプリント基板の製作が容易なうえ、高速なダイオードを内蔵しているため H ブリッジによる制御回路において転流ダイオードとして使用できる等の特長を持っている。

表 3.1 パワー MOS FET の仕様

項目	記号	定格値	単位
ドレイン・ソース間電圧	V_{DSS}	500	[V]
ゲート・ソース間電圧	V_{GSS}	± 30	[V]
ドレイン電流	I_D	50	[A]
せん頭ドレイン電流	I_D (pulse)	200	[A]
逆ドレイン電流	I_{DR}	50	[A]
逆回復時間	t_{rr}	120	[ns]
ON 抵抗	$R_{DS(ON)}$	0.085	[Ω]
許容チャネル損失	P_{ch}	250	[W]
チャネル温度	T_{ch}	150	[$^{\circ}C$]
保存温度	T_{stg}	$-55 \sim +150$	[$^{\circ}C$]

3.3.2 並列接続による大電流化

パワー MOS FET はゲート・ソース間電圧によってドレイン・ソース間の抵抗が変化する素子である。すなわち、パワー MOS FET が OFF の時はドレイン・ソース間はハイインピーダンスであり、電流を流すことはできない。一方、ON の時は低抵抗状態にあり、電流を流すことができる。

このオン抵抗は温度に依存しており、高温になるにつれて抵抗値が増加する特性を持っている。ここで 2 個以上のパワー MOS FET を並列接続した場合について考察する。もし、1 つの素子に電流が集中して流れるようなことがあると、その素子の電力損失 ($I_D^2 \times R_{DS(ON)}$) によって、素子の温度が上昇して ON 抵抗が増加する。その結果、その素子に流れる電流は減少し、その分ほかの素子に電流が分散される。すなわち、1 つの素子に電流が集中しない。したがって、パワー MOS FET は並列接続して使用することができる。

また、パワー MOS FET は熱的に自己安定機能を持っている。これは、1 つの素子

が複数の小さな並列接続されたセルによって構成されており、各セルの ON 抵抗が正（上記による）であるという特性に起因している。

本研究ではパワー MOS FET を 8 段並列接続した回路構成で、素子 1 つあたりの損失電力を抑えるようにした。これにより、コントローラの効率向上と発熱の低減化が実現でき、特別な冷却手段を全く用いることなく、ごく普通の自然放熱だけで 150[A] という大電流の連続制御が可能となった。

3.4 制御回路の設計

大会規則により、ソーラーボートは前進・後進、すなわち、モータの正転・逆転を行わなくてはならない。しかし、ナイフ・スイッチによりモータの回転方向を制御していたのでは配線を操縦席まで延ばさなければならないため、配線が長くなり重量が増加する欠点がある。

そこで、モータの制御回路にはパワー MOS FET とリレーを使った H ブリッジ回路を採用した。リレーは自動車のスタータモータ用のものを流用した。また、レースのスタート以前でのバッテリーの消費を避け、太陽電池のみで航行できるようにするためのバッテリー切り離しリレーと、コントローラの損失電力を無くするためのバイパスリレーを制御回路に組み込み設計した。モータの制御回路を図 3.3 に示す。なお、マイコン制御によるパワー MOS FET の駆動回路については第 5 章 5.3.2 節で詳しく述べる。

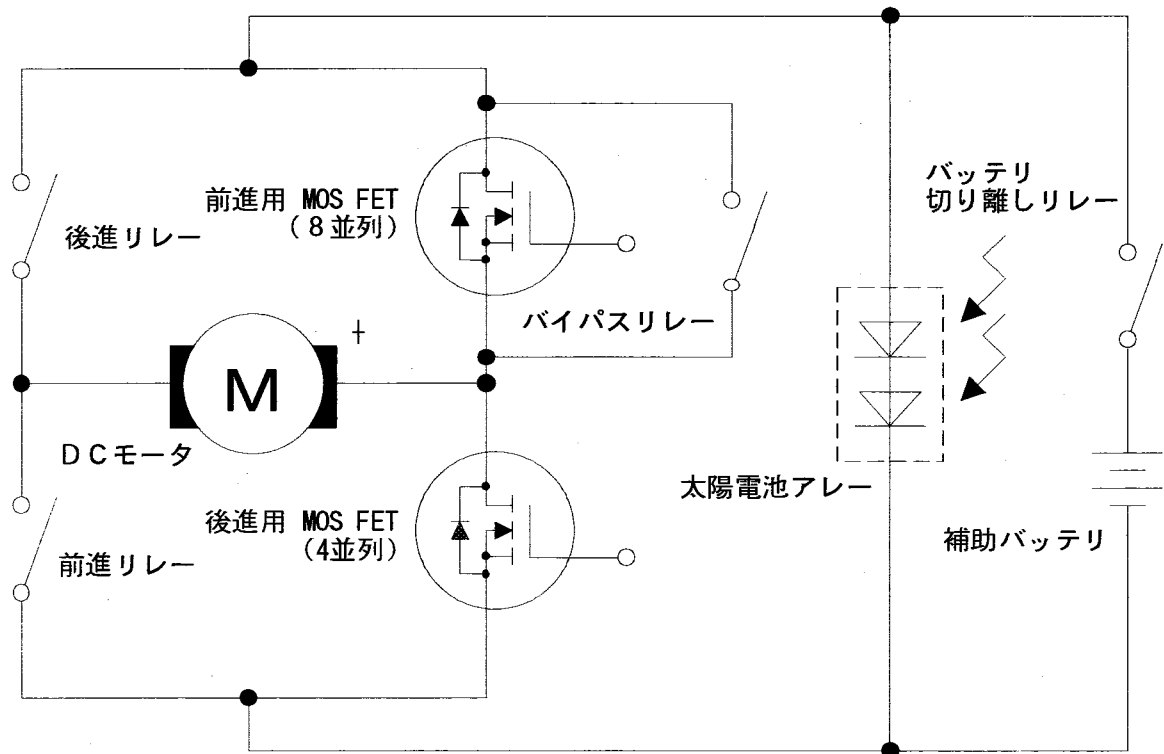


図 3.3 モータの制御回路

3.5 保護回路の設計

本研究では、PWM 制御によりモータの回転数制御を行っているが、パワー MOS FET は高速スイッチング素子であるため、ターン ON やターン OFF のスイッチング時に電流変化率 (di/dt) が非常に高くなる。さらに、負荷がモータであるため回路において高いインダクタンスが存在する。

したがって、スイッチング時には主端子に次式で表されるスイッチング・サージ電圧が発生する。

$$\Delta V_{DS} = L \times \frac{di}{dt}$$

ΔV_{DS} : サージ電圧 L : インダクタンス $\frac{di}{dt}$: 電流変化率

この式に示すように、パワー MOS FET に入力されるサージ電圧は回路に存在するインダクタンスと電流変化率に比例する。つまり、素子をサージ電圧破壊から守るためにはインダクタンスを低減するか、電流変化率を下げなければいけない。しかし、負荷がモータであるため、インダクタンスは低減のしようがなく、電流変化率を下げることは PWM 周波数を下げることになり高速スイッチングの性能を低下させる。また、電流変化率は素子のゲート抵抗 R_G によって多少制御することができるが、電流変化率を低くすることはスイッチング損失を増加することになるので限界がある。図 3.4 にターン OFF 時のスイッチング波形を示す。

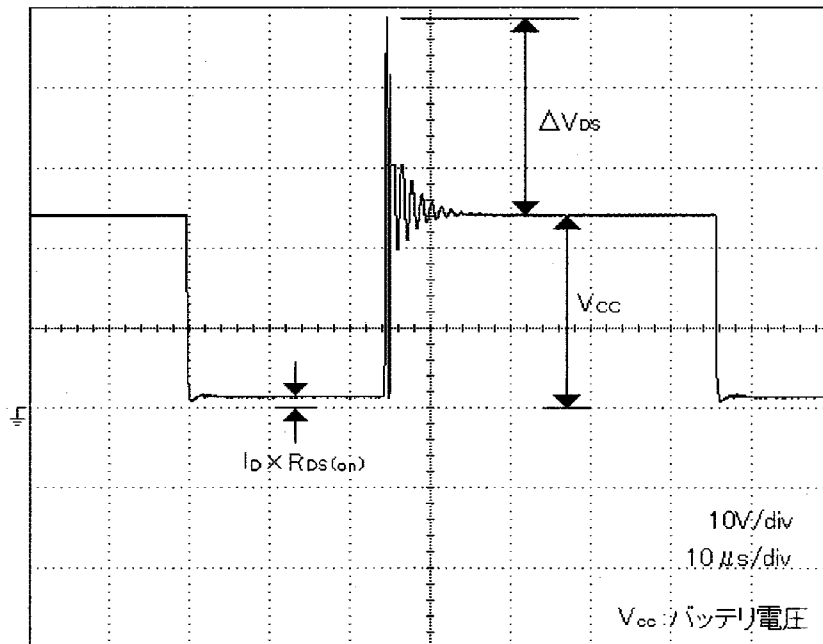


図 3.4 ターン OFF 時のスイッチング波形

したがって、このサージ電圧から素子を保護する必要がある。サージ電圧を抑制する方法は、大別してツェナ・ダイオードによるものとはスナバ回路を使うという 2 つの方法がある。ツェナ・ダイオードを用いる方法では、吸収されるべきサージ・エネルギーがすべてツェナ・ダイオードで消費されるため良い方法とは言えない。そこで、スナバ回路を使ってサージ電圧を抑制した。スナバ回路とは、コンデンサ、抵抗、ダイオードを組み合わせた回路であり、一般的に IGBT のサージ電圧対策に使用されている。⁽¹³⁾

本研究では、パワー MOS FET を使用しているが、サージ電圧が発生する原理は IGBT の場合と同じため、スナバ回路を使用した。スナバ回路は、ダイオードとコンデンサがモジュール化された双信電機株式会社製のスナバモジュール (SM04205B400JJ25N) と市販の抵抗を組み合わせることで製作した。図 3.5 に製作したスナバ回路を示す。

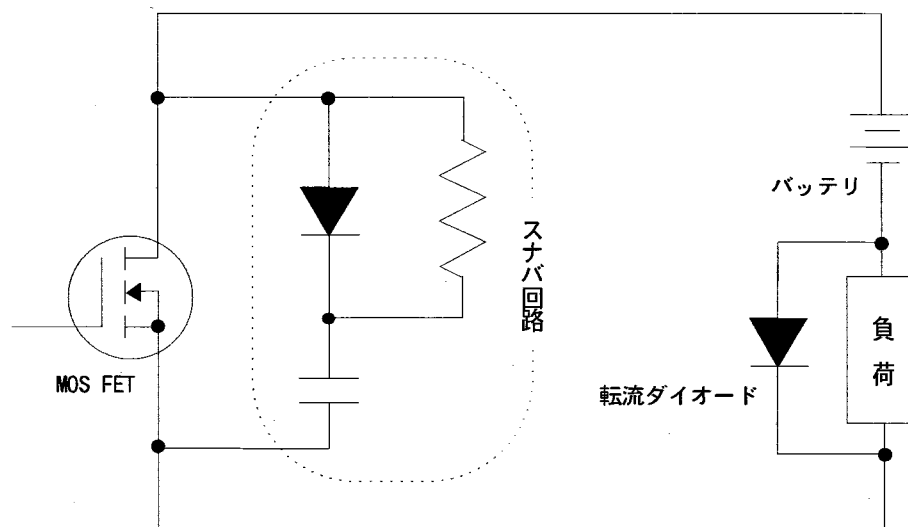


図 3.5 スナバ回路

図 3.5 に示すスナバ回路の動作について説明する。ターン OFF 時に発生したサージ・エネルギーはダイオードを通してコンデンサに充電され、コンデンサは一時的に高電圧となる。その後、MOS FET がターン ON するとコンデンサに充電されたサージ・エネルギーは、その電圧が電源電圧になるまで抵抗を介して再び回路へ放電される。