

セニアカー駆動用簡易型パワーコントローラ

新カリ「創造・発見」対応教材の開発

Power controller for the senior car drive system

Development of a teaching material for “Exercises for Creation and Invention”

恩田 一* 土肥 稔*

Hajime ONDA Minoru DOHI

Abstract: A new type of electric power controller is applied, modified and tested for newly starting curriculum “Exercises for Creation and Invention”. The power controller is a reasonable model kit and modified to increase output power. This paper describes the features of the controller and the way of modifying it. In order to increase output, powerMOSFET is used in parallel and surge killer circuit is added for the security against switching noises. **Key word;** power controller, power MOSFET, duty factor control, DC motor

1. はじめに

2012年度から新カリキュラムの「創造・発見」が始まるが、これに対応した教材としてセニアカー駆動用パワーコントローラを試作・実験し、教材として利用できることを確認したので、記録として残しておくことにする。

筆者は、これまでも2, 3年生を対象とした旧カリキュラム「創造・発見」でセニアカー駆動用パワーコントローラを自作し、本体に実装して自走する授業を行ってきた¹⁾。この授業では、駆動回路は回路パターンの無いユニバーサル基板上に自由に部品配置し、半田付けする方法をとってきた。この方法は製作の自由度はあるが、半田付けの初心者には難しすぎるくらいがあった。2012年度からの新カリキュラムでは1年生対象であるので、この従来方法は適用困難と考え、より簡易的な方法を検討した。

2. 対象パワーコントローラの選定

制御対象のセニアカーは直流モータ駆動である。従ってパワーコントローラもこれに対応するものであり、通称PWM方式（正式にはパルスデューティファクタ制御）と呼ばれる降圧チョップパ式パワーコントローラが必要である。新方式採用の基本的な考え方として下記を重視した。

- ①市販品の回路パターン化された安価なキットを利用
- ②最適なものが無ければ良さそうなものを改造する。
- ③対象物は基本動作原理が判り易く、改造が易しく、その理由も明確であること。
- ④電力用素子からの発熱があるので、冷却し易い構造であること

以上の観点からいくつかのサンプルを検討し、結果として下記を選定した。

メーカー；マイコンキットドットコム

型 式；MK507

仕 様；入力電圧 DC12～48V

出力電流 DC 7.5 Amax

制御方式 パルスデューティ比制御（通称PWM）

価格；キット本体@2,110

選定したキットの外観写真を図1に、基板のバターン図（裏面）とシルク図（表面）を図2に示す。



図1 選定市販キット（MK507）完成品

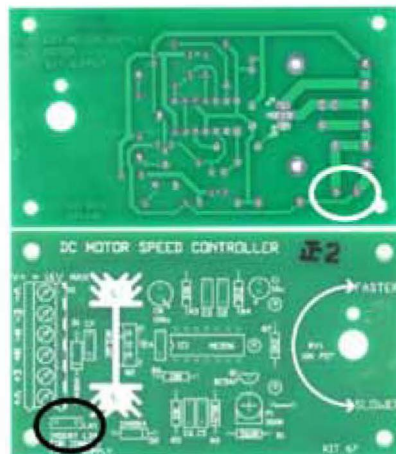


図2 基板表裏面写真

2012年3月2日受理

* 理工学部 電気電子工学科

3. パワーコントローラの構成と動作

市販キット MK507 の回路図を図3に示す。回路は以下の4部分から成り立っている。

①キャリアパルス発生部

デューティ制御用キャリアパルスの発生回路。デュアルタイマ IC 556 (図1中央, IC ソケット付) を利用している。

②電圧指令部

出力電圧の大きさを可変抵抗器 RV1 で設定する回路。RV1 は図1の右側に配置されている。

③デューティ制御部

②からの設定電圧により出力パルス幅を生成する回路。デュアル型タイマ IC556 の半分を利用。

④電力制御部

デューティ制御されたパルスをパワーMOSFET (IRF530N; メーカー IR, 図1左側の放熱フィンに取り付け) で電力増幅する降圧チョップ回路である。スイッチングに伴う無効電力吸収のためフライホイールダイオード D1 を必要とし、これはパワーMOSFET と同等の能力が必要。

なお、本回路を動作させるに必要な電源は制御用 (5~15V) とパワー用 (Max. 48V) を外部から供給する。両方とも 12V 程度の電圧で共用する場合は“LK1”のジャンパー線を短絡して使用する。出力増大のために高電圧を利用する場合は“LK1”を開放して、信号用とパワー用の2つの電源を供給する。

4. 改造の必要性

本パワーコントローラを取り付けるセニアカーのモータの定格仕様は下記である。

- ・電圧 24V
- ・出力 360W
- ・電流 15A

これから、まず電流容量が不足する。そのため、下記改造が必要となる。

①パワーMOSFET 並列使用

より大容量のパワーMOSFET を使用方法もあるが、放熱器をそのまま利用するために、同一部品を2個、同じ放熱器に背中合わせで取り付ける方法を選択。放熱器はその表面積からみて不十分と思われるが、必要であれば、その上に同型を追加するか空冷用ファンを追加する等の対策をする。

②フライホイールダイオード D1 の強化

現行品は電流容量 1 A 品であるので、高容量化した型式 P 600 B (100V, 6 A) に変更する。平均電流容量は 6 A であるが、フライホイールダイオードとしてはその倍程度の電流容量はカバー可能と判断した。これも発熱を伴うので、放熱のためにリード線を長くして基板に取り付け、放熱器として利用する。

③サージキラー (スナバー) Ds, Cs, Rs 追加

スイッチングに伴うサージ電圧を吸収するために、パワーMOSFET の両端にコンデンサ Cs と抵抗 Rs 及びダイオード Ds からなるサージキラーを追加する必要がある。これが無いと、スイッチング時にパワーMOSFET のドレイン電圧が耐圧を越して破壊される可能性がある。Cs は無極性、Ds は元々キットについていた D1 を流用。Rs は発熱するので 3 W 程度のものがよい。

④回路パターン強化

市販品の電流容量はプリント回路の配線パターンからも制約されているので、これを太い電線で強化する必要がある。強化が必要な箇所はパワー部で、図2上部のパターン図で右側の太いパターンが対象である。

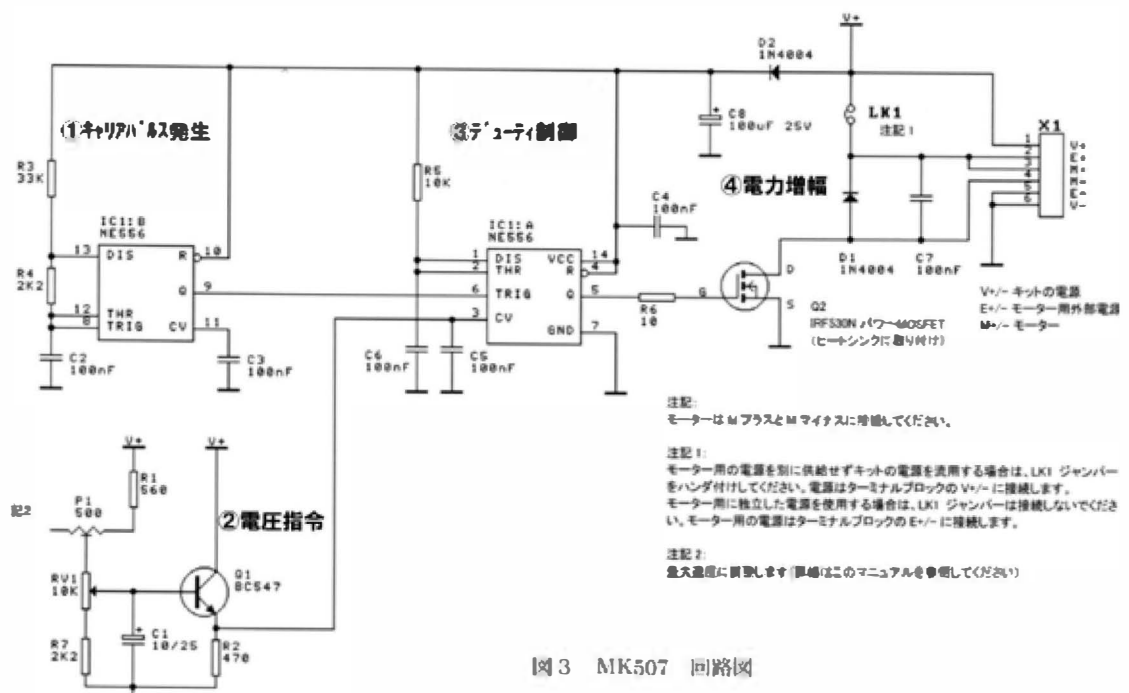


図3 MK507 回路図

以上の改造を行った回路図を末尾の付録に、改造後のパワーコントローラ基板の表面、裏面の写真を図4に示す。

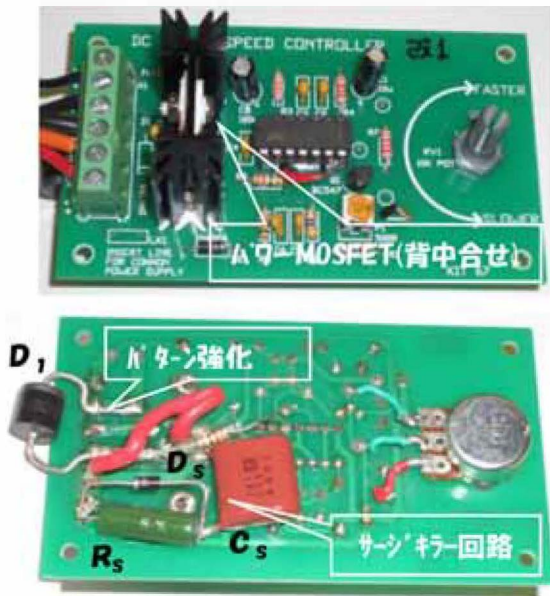


図4 改造後基板写真

図4上の写真で、パワーMOSFETは同一放熱器に背中合わせで取り付けられている。この時、3つある端子の両側（ゲート、ソース）が逆になるので注意が必要である。基板に追加穴開けして真中の端子はそのままパターンに半田付けし、両側の端子は逆側のパターンに半田付けする。なお、両パワーMOSFETのゲートドライブは完全並列ではなく、前段のIC556から抵抗 20Ω を介して別々に駆動する方式とした（付録回路図参照）。

フライホイールダイオードD1は、そのリード線をパターンの強化と放熱機能両方を兼ねて写真のように利用した。サージキラー用ダイオードDsは、元々のキットの部品D1を流用している。サージキラーは形状が大きくなるので、基板上に形よく配置する必要がある。

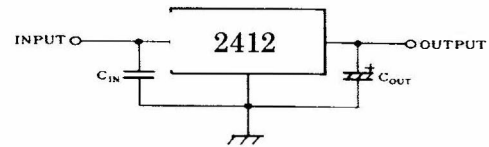
5. 制御用12V電源の供給

パワー用電源を24Vとした時、別途制御用に12V電源が必要になる。モジュール式のDC/DCコンバータをパワーコントローラの外に準備するのが標準的な方法で、旧カリキュラム創造発見では、この方法を採用していた。今回は出来るだけ簡単（安価）にすることを念頭に、3端子レギュレータICを利用する方法を採用した。

パワー電源電圧は24Vで12Vの信号用電源に降圧するために、IC2412を利用する。その使用方法と端子機能を図5に示す。端子1に24V電圧を入力し、端子3から12V電圧が出力される。基板上への取り付けは、図3の回路図で右上のV+とE+をリンクさせるLK1のジャンパー接続パターンを利用する。このパターンは図2の基板写真上の楕円で囲った部分で、この2つのホールにE+側を24V入力端子1を、V+側に12V出力端子3を半田付けする。

GND端子2はリード線を半田付けして直接V-端子に接続する。

■標準接続



■端子接続

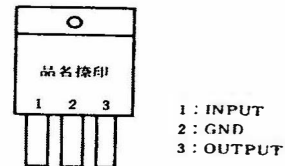


図5 3端子レギュレータ

3端子レギュレータを基板に取り付けた様子を図6に示す。これにより、24V電源のみでパワーコントローラを使用することができる。

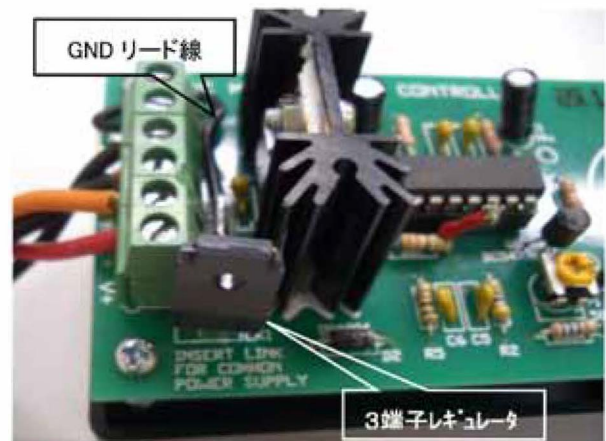


図6 3端子レギュレータの取り付け

6. 動作実験と各部動作波形

改造したパワーコントローラでセニアカーを動作させ、各部動作波形を確認した。波形計測のため、自走ではなく車輪を上げてカラ回転させた状態で計測した。

図7に各部動作波形のオシログラムを示す。上段の波形はパワーMOSFETのゲート電圧で、デューティ信号を示す。中段の波形は片方（付録図中のQ3）のパワーMOSFETに流れる電流波形、下段はパワーMOSFETのドレイン・ソース端子間電圧である。ほぼ理論通りの波形を示している。電流のピーク値は8Aであり、この時の直流電源からの電流平均値は2Aであった。スイッチングに伴うドレイン電圧のピーク値は45V程度で、パワーMOSFET 1RF530Nの最大定格100V以下であり、フライホイールダイオードとサージキラーの効果が発揮されている事が判る。

動作中のパワーMOSFETの温度は36℃、放熱器は33℃で、車輪を上げた状態では全く問題なしであった。

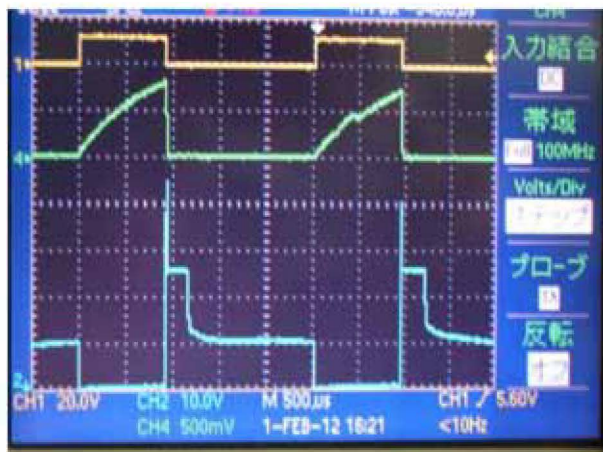


図7 各部動作波形

7. プリント基板のケースへの取り付け

図1に示すように、プリント基板はプラスチックケースに取り付けるようになっている。改造後のプリント基板はフライホイールダイオードが基板裏に取り付けられている。フライホイールダイオードは冷却が必要なため、ケースに直接取り付けしまうと密閉状態になり、冷却が悪化する。対策として、プリント基板をスペーサで持ち上げて空気の出入り可能な隙間をつくることにした。完成したパワーコントローラの写真を図8に示す。



図8 ケースに取り付けたプリント基板

取付方法はケース側のビス穴をφ2.5に拡大し、M3のボルト・ナットで図8の様に固定する。基板とケースの隙間は5～10mm程度が良い。

8. 自走実験

完成したパワーコントローラをセニアカーに設置して自走実験を行った。D駐車場からクラブハウス横の坂道をテニスコートに向かって登坂した。走行動作は全く問題なく走行できた。平地走行ではバッテリー電流は3～4A、登坂では8A程度であった。また、縁石に乗り上げて車輪ロック状態ではバッテリー電流が20Aになったが、制御動作に異常はなかった。

パワーMOSFETの素子温度は平地走行時は15℃程度だっ

たが、テニスコートへの坂道登坂後は40℃であった。この時、外気温は3℃程度だったので、温度上昇として37℃程度になる。この時は外気の風速も強く、冷却に好条件であったが、夏のように外気温の高い場合には素子温度の限度を越す可能性がある。例えば外気温30℃の場合は、素子温度が67℃程度になり、パワーMOSFETとしては限界となる。この場合は放熱器の強化や外部ファンによる空冷等を考慮する必要がある。

9. 冷却の検討

自走実験結果から、電気的性能は全く問題ないがパワーMOSFETの冷却が十分でないことが判明した。そこで現状放熱器での動作性能限界と冷却の改善方法について検討する。

熱源 P (W) を熱抵抗 R_{th} (℃/W) の放熱器で冷却した場合の温度上昇 ΔT は(1)式で表される。

$$\Delta T = P \cdot R_{th} \text{ (℃)} \quad (1)$$

ここで、 P はパワーMOSFETの損失でほとんどがオン損失と考えられ、パワーMOSFETを流れる平均電流を I_{dc} とすると(2)式で示される。

$$P = I_{dc}^2 \times R_{DS(on)} \quad (2)$$

ここで、 $R_{DS(on)}$ はパワーMOSFETのオン抵抗(ドレイン・ソース間)で、カタログ値は0.1(Ω)であるが、ここでは並列駆動のため、合成抵抗値はその1/2になる。

平均電流を10(A)とすると温度上昇は(3)式になる。

$$P = 10^2 \times 0.1 / 2 = 5.0 \text{ (W)} \\ \Delta T = P \times R_{th} = 5.0 \times 10 = 50 \text{ (℃)} \quad (3)$$

ここで、熱抵抗 R_{th} の値は現在使用されている放熱器のカタログ値(10℃/W)である。

以上の結果、パワーMOSFETに平均10Aの電流を流すと、現状の放熱器では50℃の温度上昇になる。実際の素子温度はこれに周囲温度を加算したものであり、夏の周囲温度30℃の場合は80℃に達することになる。

半導体素子の上限温度は60℃程度で、現状の回路でこの範囲に治めようとするとき流しうる直流電流はどの程度になるか検討する。周囲温度を30℃とすると温度上昇分は最大30度となり、(3)式より許容損失は3(W)となる。従って、

$$I_{dc}^2 < 3.0 / R_{DS(on)} = 3.0 / (0.1/2) = 60 \quad (4)$$

これより、許容電流 I_{dc} は7.7Aとなる。

自走実験でテニスコートへの坂道登坂では8A程度の電流であったので、それが上記上限より少し上程度だったと思われる。

なお、ここではパワーMOSFET には連続して平均電流が流れるものと仮定して検討しているが、実際は図7に示すように、パワーMOSFET に流れる電流波形はデューティ制御されていて、連続流ではないことを注記しておく。平均電流 10(A)とはモータに定格電流 15(A)を流している時にパワーMOSFET に流れる電流の大きさを想定している。

次に、平均電流 10(A)を流すために必要な放熱器について検討する。(2)式より、平均電流 10(A)の時のパワーMOSFET の損失は 5 (W) であるので、必要な熱抵抗の大きさは下記である。

$$R_{th} < \Delta T/P = 30/5.0 = 6.0 \quad (5)$$

即ち、熱抵抗が 6.0(°C/W)以下の放熱器を使用する必要がある。現状の放熱器は熱抵抗が 10(°C/W)であり、これを2段重ねにすれば、熱抵抗は半分にはならないが、3割減程度は期待できるので何とか使えると思われる。さらには、外部に冷却用ファンを設けると熱抵抗は半分程度に低下するので、これも一つの方法である。

他の方法として、パワーMOSFET をよりオン抵抗の低いものに変更する方法がある。現行の IRF530N も 0.1(Ω)と低い方であるが、例えば 2SK2512 は $R_{DS(on)}$ が 0.02(Ω)である。このパワーMOSFET はもともとスズキ製セニアカーのドライバーに使用されていたもの(基板は ASTI 製)で、低電圧 (60V)、大電流 (45A) 用である。これを2個並列で使用すれば、(3)式より $P = 1$ (W)、 $\Delta T = 10$ °C となり、温度上昇を 10°C 程度に抑制でき、真夏での素子温度を 50°C 以下には出来る可能性がある。ただし、2SK2512 は絶対最大電圧 (V_{DSS}) が 60 (V) のため、図7に示すスイッチング時のドレイン電圧上昇が限界に近い値になる。このため、サージキラーを完璧にしておく必要がある。また、スイッチング速度が IRF530N より 1 桁遅い(数百 ns) ため、スイッチング損失を考慮する必要がある。概算ではスイッチング損失は 0.5(W) 程度になる。

10. まとめ

新カリキュラムの「創造・発見」授業用に市販品の安価なキットを改造し、自走可能なセニアカー駆動用パワーコントローラを試作した。プリントパターン化された回路で製作が比較的簡単であり改造も容易であるので、1年生の授業用としても適していると思われる。

また、本パワーコントローラは大学祭の電気自動車コンテストにおけるモータ駆動用にも応用が可能である。昨年には一組の学生が MK507 をそのまま使用して登坂中に燃えたことがあった。これは上記の放熱が不十分だったことが原因で、上記対策をすれば利用が可能と思われる。出来るだけ沢山の場面で多数の学生に利用して頂きたい。

必要な費用は概略下記である。

(ただし、1 個での購入不可のものあり)

MK507 キット ; @2,110

追加部品

①ダイオード P600B ; @30

②パワーMOSFET IRF530N ; @100

③サージキラー用コンデンサ Cs ; @110

④サージキラー用 抵抗 Rs ; @20

⑤3 端子レギュレータ IC ; @100

合計 ; ¥ 2,470

「ものづくり」教育では「うごくもの」を作ることは学生にとっても大変興味深いことであり、さらに、そのうごくものに自分が乗って運転出来ることは興味が倍増する内容であると思われる。また、マニュアル通りに製作して簡単にうごいてしまうことより、どこかで失敗して原因を探り、改良して完成させるような指導が出来ること、教育的価値はさらに上昇するものと思われる。本コントローラを利用して授業内容の向上を目指したいと思う。

参考文献

- 1) 恩田 一 ; “「創造・発見 ものづくりと創作活動」における電動カー駆動部の製作”, 静岡理科大学紀要第 18 巻, P141 (2010).
- 2) マイコンキットドットコム社 ; MK507 組立マニュアル
- 3) IR 社 ; IRF530N データシート
- 4) Vishay General Semiconductor 社 ; P600A データシート
- 5) NEC 2SK2512 データシート

