

2相ステップモータにおける高速トルクの改善

National Semiconductor
Application Note 828
Steven Hunt
May 1993



はじめに

高速で正確なモータ駆動を実現する上で、モータとドライバーの最適な組み合わせにより十分なトルクを発生させることが必要です。これにより、慣性負荷を任意の率で加速し、任意の速度で負荷トルクをドライブすることができます。一般に、2相ステップモータのサイズは低速トルクに影響し、モータ巻線に電流を流すドライブ回路性能は高速トルクに影響します。本アプリケーション・ノートでは、2相ステップモータの巻線電流の高スルーレートにより、さらに高速のモータ・トルクが得られることを説明します。また、単純電圧ドライブ、L/Rドライブ、チョップ・ドライブについても説明します。L/Rドライブとチョップ・ドライブでは、単純電圧ドライブよりも速いスルーレートが得られます。本文の終わりに、チョップ・ドライブの回路例を示します。

動作原理

標準のフルステップ動作では、直角(90°位相)の2相電流 (Fig. 1) が2相ステップモータに流れます。巻線電流のどちらかが流す電流の方向を変化するたびに1ステップが発生し、電流方向変化の4倍の周波数でステップモータがステップアップ(1回転)します。Fig. 1の巻線電流は理想的な無限のスルーレートを示しています。

理論上、各位相で正弦波のトルクが発生します。

$$T_1 = -i_1 T \sin(N\theta) \quad (1)$$

および、

$$T_2 = i_2 T \cos(N\theta) \quad (2)$$

ここで、巻線電流 $i(t)$ の単位は(A)、トルク定数 $T \sin(N\theta)$ と $T \cos(N\theta)$ の単位は(Ncm/A)です。 θ は安定したディテント(ゼロ・

トルク)位置に対するロータの角変位を表わします。Nはモータの極数(メカニカルなサイクル、又は1回転あたりの電気的なサイクル数)を表し、したがって、 $N\cdot\theta$ はメカニカルなロータ位置と電気的に等価になります。これらのトルク定数を加算することで、総トルク値が得られます。

$$T_t = T_1 + T_2 = T(i_2 \cos(N\theta) - i_1 \sin(N\theta)) \quad (3)$$

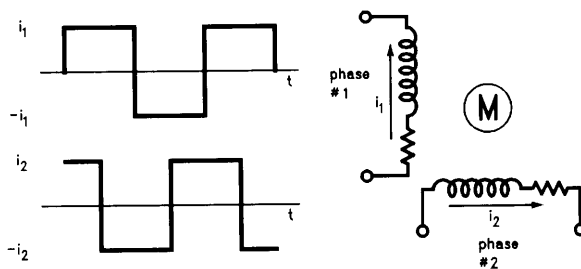
トルク定数の全期間にわたり(3)を積算し、その値を全期間の逆数で乗算すると、モータが発生する平均トルク値が得られます。方形波巻線電流と正弦波トルク定数が理想的なもの(Fig. 2)であれば、モータが発生する平均トルク値は次式から求められます。

$$T_{avg} = \frac{1}{2\pi} \left[\int_0^{2\pi} -i_1 T \sin(N\theta) dN\theta + \int_0^{2\pi} i_2 T \cos(N\theta) dN\theta \right] = \quad (4)$$

$$= \frac{2}{\pi} I_{rated} T \cos\phi. \quad (5)$$

オープン・ループのアプリケーションでは、モータが発生する平均トルク値が、特定の動作タスクを行うのに必要なトルク値と一致するように、 ϕ 値で自動調整します。巻線電流とそれらの各トルク定数が同調している場合($\phi = 0$)は、モータは次式から求められる最大平均トルク(あるいはプルアウト・トルク)が発生します。

$$T_{pull-out} = T_{avg}(\max) = \frac{2}{\pi} I_{rated} T. \quad (6)$$



TL/H/11453-1

FIGURE 1. 理想的な直角の2相電流ステップモータ巻線のドライブ

方形波は低速の巻線電流に限り優れた近似値を表わすので、式(6)から低速のプルアウト・トルクのほぼ正確な値を求めることができます。実際の巻線電流は指数関数的な形状を示します。この形状は巻線のL/R時定数と巻線の印加電圧で決まり、またロータの回転時にモータが発生する逆起電力(V_{emf})でも決まります。

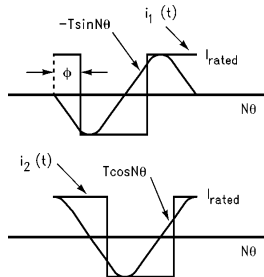
いずれかの巻線において:

$$i(t) = \left(I_0 - \frac{V_{CC} - V_{emf}}{R} \right) e^{-\frac{R}{L}t} + \frac{V_{CC} - V_{emf}}{R} \quad (7)$$

上記の式から電流方向変化時の巻線電流の値が得られます。ここで、 I_0 は初期巻線電流、 V_{CC} は巻線の印加電圧、 V_{emf} は逆起電力電圧、 R および L は巻線の抵抗とインダクタンスを表わします。

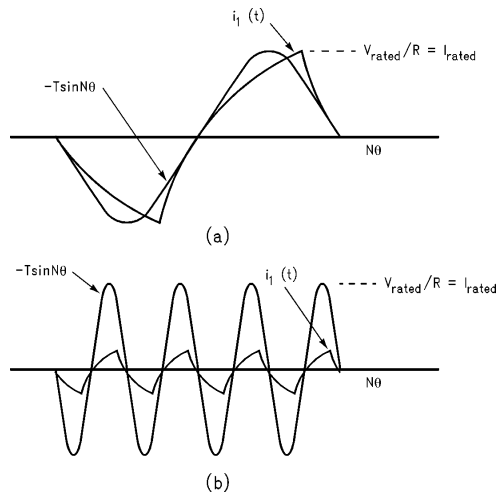
低速のステップレートの場合は、 $V_{CC} = V_{rated} \gg V_{emf}$ であれば、次に方向変化が起こる前に電流が V_{rated}/R のピーク値に容易に達してしまいます(Fig. 3a)。高速のステップレートの場合は、方向変化に要する時間がさらに短いので、電流が V_{rated}/R のピーク値に達することはありません(Fig. 3b)。 V_{rated} は巻線の定格電圧を表わします。

式(4)とFig. 3から明らかなのは、速度の増加に伴い巻線電流が減少し、結果として $T_{pull-out}$ が減少することです。この現象は、「代表的な2相ステップモータのトルク速度特性」の曲線グラフ(Fig. 4)で示されています。このグラフでは、各プルアウト・トルク曲線はトルク速度の組み合わせ領域(右側)を境にして、領域内であればステップモータは駆動し、領域外にあればストール(停止)します。



TL/H/11453-14

FIGURE 2. 平均トルク値計算用の理想的な方形波巻線電流および正弦波トルク定数



TL/H/11453-15

FIGURE 3. “実際の巻線電流および正弦波トルク定数”対“ステップレート”:低速ステップレート(a)、高速ステップレート(b)

したがって、高速トルクの加速化は高速で巻線電流を増すことで実現でき、巻線電流のスルーレートを高めて行います。例えば、 V_{CC} を V_{rated} よりもかなり高くしてスルーレートを速くすると、巻線電流は低速ステップレートと高速ステップレートの両方で V_{rated}/R のピーク値に容易に達します (Fig. 5)。 $V_{CC} = V_{rated}$ における巻線電流は破線で表わし、 $V_{CC} > V_{rated}$ における巻線電流は V_{rated}/R の定格リミットに対する平均値として実線で表わしています。

巻線電流のスルーレートは巻線の L/R 時定数を低減し、同時に巻線の印加電圧を上げることで高まります。L/R ドライブとチョップドライブでこの方法を用いると、巻線に定格電圧を加えただけのものよりも、はるかに速い巻線電流のスルーレートが得られます。代表的な2相ステップモータのトルク速度特性グラフ (Fig. 4) に示す高速トルクのゲインは、この方法によって実現しています。

ただし、 $V_{CC} > V_{rated}$ を加えると、低速時に過度の巻線電流も生じるので特に注意が必要です。巻線電流は定格リミット (通常、巻線あたり V_{rated}/R) 以下に保持し、モータ内の消費電力を定格リミット (通常、 $2 \times V_{rated} \times I_{rated}$) 以下に抑える必要があります。

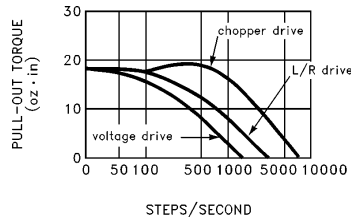


FIGURE 4. 代表的な2相ステップモータのトルク速度特性

TL/H/11453-3

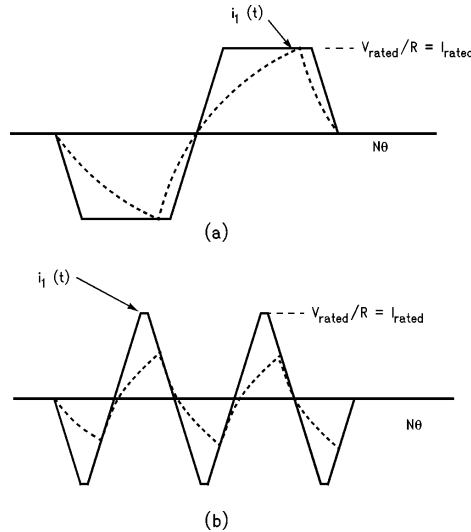


FIGURE 5. $V_{CC} > V_{rated}$ における "実際の巻線電流" 対 "ステップレート": 低速ステップレート (a)、高速ステップレート (b)

TL/H/11453-6

単純電圧ドライブ

単純ドライブの場合は、相巻線に2相電流をドライブするため、Hブリッジ・パワーアンプを2つ使用します (Fig. 6)。いずれのアンプの場合でも、スイッチS1とS4をクローズすることにより定格電圧(スイッチ2個のドロップ電圧は極めて小さい)が巻線に印加され、S1、巻線、およびS4を介して電流が電源からグランドに流れます。S1とS4をオープンしてからS2とS3をクローズすると、巻線の電流方向が逆転します。このドライブ方式は一般に単純電圧ドライブと呼ばれています。巻線抵抗は単に巻線電流を制限するだけなので、 V_{CC} が V_{rated} を超えることはありません。

巻線電流は巻線の抵抗でしか制限されないため、 V_{CC} は V_{rated} を超えることはできません。

L/Rドライブ

L/Rドライブでは、2個の直列抵抗を用いて巻線のL/R時定数を減らしています。例えば、 45Ω の抵抗を2個の 15Ω の巻線抵抗の各々に直列接続することで、L/R時定数を1/4とし、定格電源電圧を4倍に増やして応答特性と高速トルク性能の両方を改善しています。ロータが位置をホールドしている、あるいは低速ステップレートで移動している間は、直列抵抗によって巻線電流を定格リミット値に保持してモータを保護します。

この例におけるドライブは、相巻線のL/R時定数と定格電源電圧の両方が1/4又は4倍されているために、一般にL/4Rドライブと呼ばれています。

パワーアンプの最大動作電源電圧を制限することにより、供給電圧が巻線の定格電圧を超えないようにすることができますが、付加直列抵抗の電力損失による制限方法が一層効果的です。例えば、2つの $0.5A$ 、 15Ω の相巻線に $60V$ の電圧を印加する場合は、巻線電流を $0.5A$ /位相リミットに保持するために、 105Ω の直列抵抗が2個必要です。このドライブは、L/8Rドライブと呼ばれています。ロータ位置決め時における直列抵抗の消費電力は $105 \times 0.5 \times 0.5 \times 2 = 52.5W$ であり、全ドライバーの消費電力は $60 \times 0.5 \times 2 = 60W$ 、ドライブ効率率は約12.5%です。ドライブを設計する際、これらの数値を考慮し、L/4Rドライブで $30V$ 電源/ 45Ω 直列抵抗の組合わせを用いて電力損失を抑えることができます。ただし、直列抵抗の総消費電力はロータ位置決め時に $22.5W$ と高く、ドライブ効率も25%の低効率に留まります。

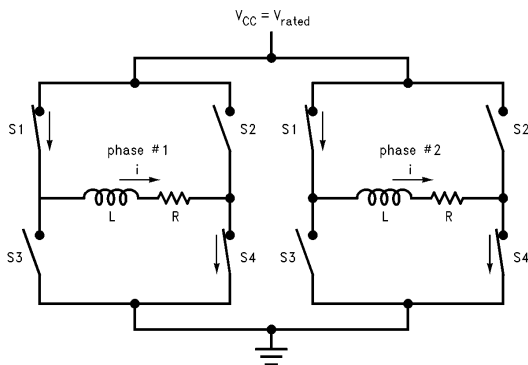


FIGURE 6. 2相ステップモータの単純電圧ドライブ

TL/H/11453-2

チョップパ・ドライブ

チョップパ・ドライブは、 $V_{CC} \gg V_{rated}$ の電源電圧を印加することで巻線電流のスルーレートを高めます。巻線電流は、フィードバック電圧によってHブリッジを切り換えることで定格リミットに保持されます。Fig. 7にチョップパ・ドライブの単一Hブリッジのチョッピング状態を示します。Hブリッジのグランド・リードに接続された小抵抗により、巻線電流を均一のフィードバック電圧に変換し、このフィードバック電圧を基準電圧 (図示されていません) と比較します。フィードバック電圧が基準電圧以下の間は、スイッチS1とS4を介して巻線に全電源電圧が印加されると (Fig. 7a)、巻線電流が急激に増加します。フィードバック電圧が基準電圧に等しい (巻線電流が適切なりミット値に達した) 場合は、S1とS2により一定時間またはオフタイムの間巻線が短絡します (Fig. 7b)。オフタイムの間、巻線電流は再循環してゆっくりと減衰します。オフタイムの終わりには、S1とS4を介して巻

線に全電源電圧が印加され、巻線電流が再度増加します。このシーケンスの繰り返しによって電流のチョッピング動作が生じ、基準電圧とアンプのグランド・リードに接続された抵抗値に基づく一定のレベルにピーク巻線電流を制限 ($limit = V_{reference}/R_S$) します (Fig. 7c)。チョッピング電流は、電流が適切なりミット値 (通常は巻線の定格電流) に達した時に限り発生します。巻線電流の方向が変化してモータ・ステップが生じた場合は、S2がクローズ状態に置かれてS1とS3が切り換わって巻線電流に制限が加わる以外、基本的な動作は同じです。Hブリッジが巻線を短絡する時間が一定なので、このタイプのチョップパ・ドライブは一般に“固定オフタイム”ドライブと呼ばれています。L/Rドライブが必要とする直列抵抗を排除することで、チョップパ・ドライブのドライブ効率を劇的に高めています。代表的なチョップパ・ドライブの効率は75 ~ 90%の範囲です。

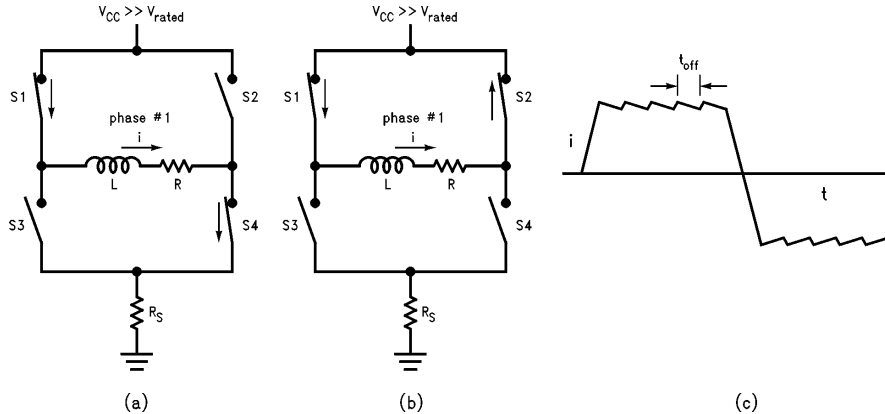


FIGURE 7. チョップパ・ドライブ単一Hブリッジ・チョッピング状態: 巻線に全 V_{CC} を印加した状態 (a)、巻線の短絡 (電流の再循環) (b)、チョッピングされた巻線電流 (c)

TL/H/11453-7

LMD18200 ベースのチョップ・ドライブ

LMD18200 は 3A、55V の H ブリッジです (Fig. 8)。マルチテクノロジー・プロセス採用により、同一のモノリシック構造上にバイポーラと CMOS による制御 (ロジック) 及び保護回路と DMOS パワースイッチを内蔵しています。LMD18200 の動作についての詳細は、LMD18200 のデータシートおよび AN-694 のアプリケーション・ノートを参照下さい。

チョップ・ドライブの回路例 (Fig. 9) では、2 個の LMD18200 H ブリッジによって回路を構成しています。このデバイスの状態を制御する論理信号は、各 LMD18200 の PWM 入力 (ピン # 5) から取り込まれます。PWM 信号が論理 HIGH 状態の間は、H ブリッジによって全電源電圧が巻線に印加され、PWM 信号が論理 LOW 状態の間は、H ブリッジの上部 2 つのスイッチによって巻線を短絡します。各 H ブリッジからのフィードバック電圧はデバイスによって駆動される巻線内の電流に直接比例します。フィードバック電圧と基準電圧の比較は、LM319 デュアル・コンパレータの一方で行います。フィードバック電圧が基準電圧以下 (PWM 信号が論理 HIGH) の間は、LMD18200 によって全電源電圧が巻線に印加され、巻線電流が増加します。フィードバック電圧と基準電圧が等しくなる点まで巻線電流が増加すると、LM319 は LMC555 ベースのワンショット回路をトリガします。ワンショットのタイミング・パルスが持続中は、PWM 信号が論理 LOW になり、LMD18200 によって巻線が短絡し、巻線電流が再循環して減衰します。タイミング・パルスの終了後には PWM 信号は論理 HIGH に戻

り、LMD18200 によって全電源電圧が巻線に印加され、巻線電流が再び増加します。このシーケンスの繰り返しにより、電流のチョッピング動作 (Fig. 10) が生じ、巻線電流が 0.5A の定格に制限され、同時に 12V の 24Ω 巻線を 36V でドライブすることが可能になります。

Note: ワンショットのタイミング・パルスは、LMC555 に起因する RC 成分によって設定します。電流のチョッピング動作を明確に示すために、ワンショットのタイミング・パルスまたはオフタイムをおよそ 100µs に設定しています。オフタイムが短い程、より滑らかな巻線電流が得られます。

デバイスによってドライブされる巻線の電流方向制御を行う論理信号は、各 LMD18200 の Dir 入力 (ピン # 3) から取り込まれます。すなわち、Dir 信号の論理レベルを変更することで、モータが 1 ステップ進みます。

このチョップ・ドライブは LMD18200 に内蔵の電流センス・アンプを活用しています。電流センス・アンプは LMD18200 の 2 つの上部スイッチにより導通される順方向電流の合計値に比例する信号レベルの電流を供給します。このセンス電流の代表値は、負荷電流 1A あたり 377µA です。電流センス・アンプ (ピン # 8) 出力とグランド間に接続の標準の 1/4W 抵抗により、センス電流を負荷電流に比例する電圧に変換します。この比例電圧は制御用/過度電流保護用のフィードバック信号として有効です。18kΩ の抵抗 (Fig. 9) により、ドライブゲインは比較電圧 1V あたり約 0.15A (377µA/A と 18kΩ の積の単なる逆数) に設定されます。

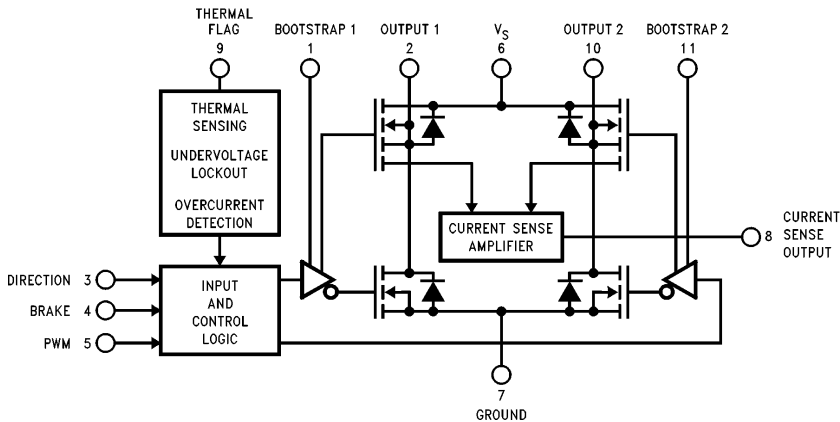


FIGURE 8. LMD18200 の 3A、55V フル H ブリッジ

TL/H/11453-8

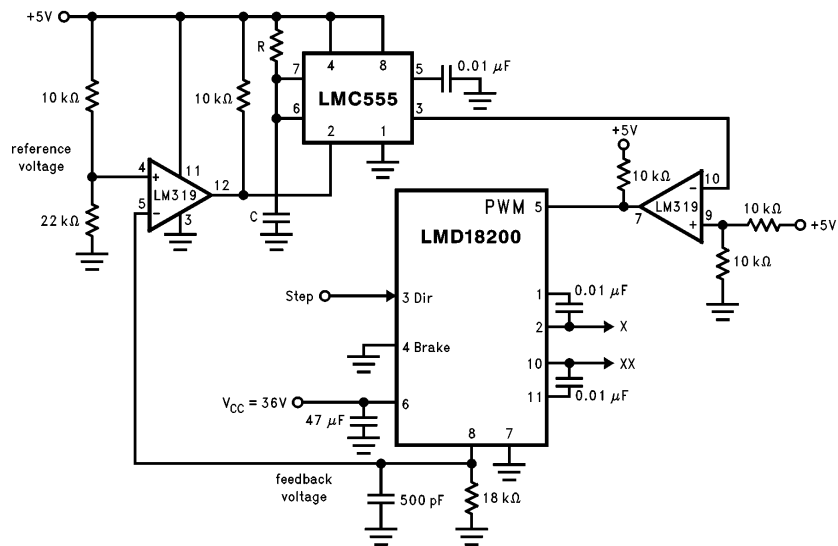
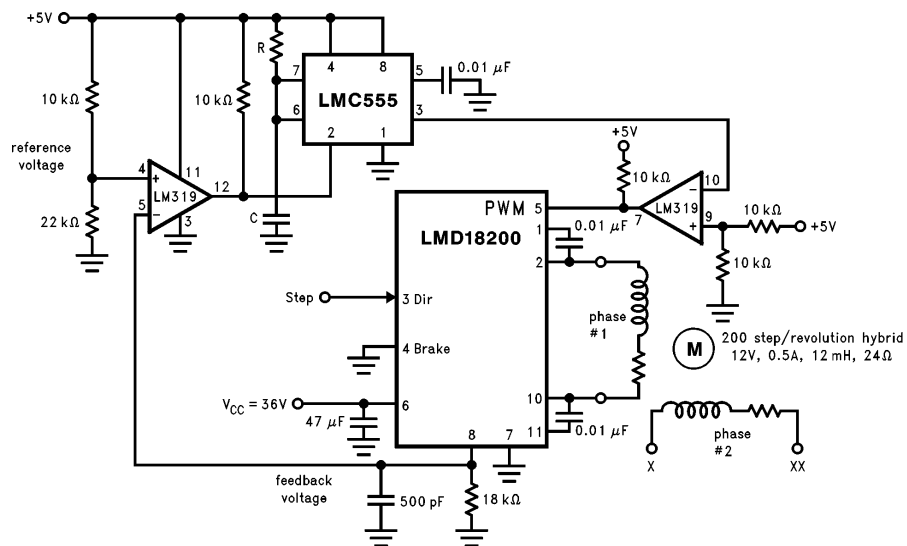


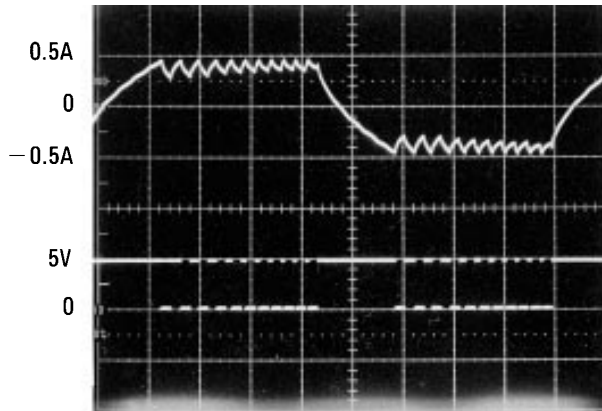
FIGURE 9. LMD18200 ベースのチョップ・ドライブ

TL/H/11453-9

電流のチョッピング動作時、フィードバック電圧は巻線電流に追従します (Fig. 11)。Dir 信号によって巻線電流の方向変化が生じると、フィードバック電圧は巻線電流がゼロ点を通過するまで巻線電流の追従を停止します。この現象は、LMD18200の2つの上部スイッチによって導通される順方向電流の合計値に比例する電流のみを、電流センサ・アンプが供給するために起こります。フィードバック電圧が巻線電流に追従していない期間中は、Hブリッジの下部および上部スイッチを介し、巻線電流は逆電流としてグラウンドから電源に流れます。巻線電

流がゼロ点を通過した後に限り、再び上部スイッチの1つに順方向電流が流れます。(AN-694を参照)。フィードバック電圧はグラウンドを基準にしているので、巻線電流の方向に関係なく同じように現われます。

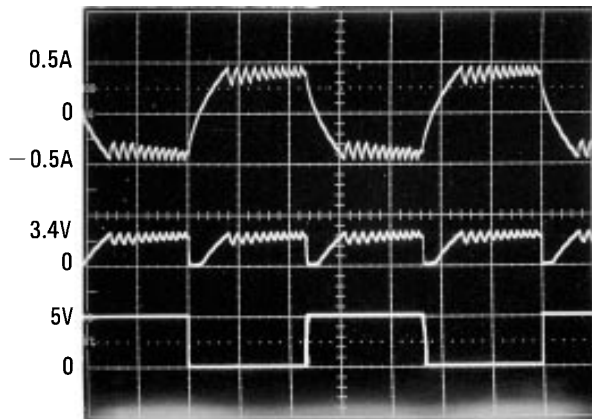
Fig. 10 ~ 13の波形測定には、同じ200ステップ/回転のハイブリッド・ステッパ (Fig. 9) を使用しています。Fig. 12に、 $V_{CC} = V_{rated} = 12V$ の単純電圧ドライブにおける巻線電流を示します。Fig. 13に、 72Ω 位相の直列抵抗と $V_{CC} = 4V_{rated} = 48V$ を付加した L/R ドライブの巻線電流を示します。



TL/H/11453-10

上部波形：巻線電流、0.5A/div
 下部波形：PWM 信号、5V/div
 時間軸：0.5ms/div

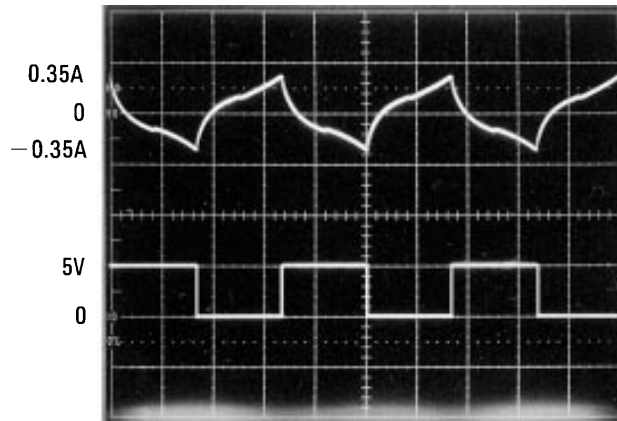
FIGURE 10. チョッピングされた巻線電流とPWM 論理信号



TL/H/11453-11

上部波形：巻線電流、0.5A/div
 中間波形：フィードバック電圧、5V/div
 下部波形：ステップ論理信号、5V/div のステップ
 時間軸：1ms/div

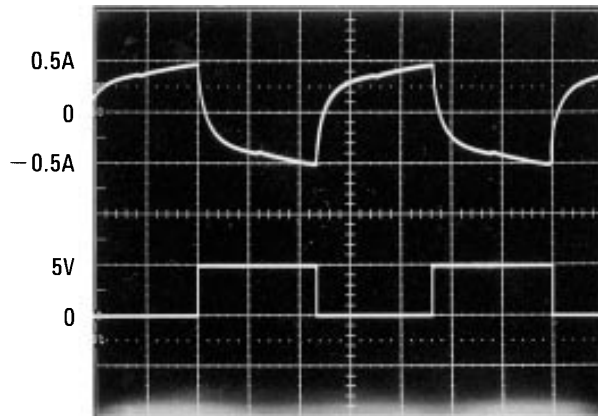
FIGURE 11. チョッピングされた巻線電流とフィードバック電圧 (860 ステップ/秒)



TL/H/11453-12

上部波形：巻線電流、0.5A/div
 下部波形：ステップ論理信号、5V/div
 時間軸：2ms/div

FIGURE 12. 単純電圧ドライブにおける巻線電流 (600 ステップ/秒)



TL/H/11453-13

上部波形：巻線電流、0.5A/div
 下部波形：ステップ論理信号、5V/div
 時間軸：1ms/div

FIGURE 13. L/4R ドライブにおける巻線電流 (860 ステップ/秒)

生命維持装置への使用について

弊社の製品はナショナル セミコンダクター社の書面による許可なくしては、生命維持用の装置またはシステム内の重要な部品として使用することはできません。

1. 生命維持用の装置またはシステムとは(a)体内に外科的に使用されることを意図されたもの、または(b)生命を維持あるいは支持するものをいい、ラベルにより表示される使用方法に従って適切に使用された場合に、これの不具合が使用者に身体的障害を与えると予想されるものをいいます。
2. 重要な部品とは、生命維持にかかわる装置またはシステム内のすべての部品をいい、これの不具合が生命維持用の装置またはシステムの不具合の原因となりそれらの安全性や機能に影響を及ぼすことが予想されるものをいいます。

ナショナル セミコンダクター ジャパン株式会社

本 社 / 〒 135-0042 東京都江東区木場 2-17-16 TEL.(03)5639-7300 <http://www.nsjk.co.jp/>

製品に関するお問い合わせはカスタマ・レスポンス・センタのフリーダイヤルまでご連絡ください。



0120-666-116



この紙は再生紙を使用しています