

ドライブ回路の基本

どんなサイズのステッピングモータでも、巻線に使えるスペースは限られています。ステッピングモータの駆動システムを最適化する上で、巻線スペースの効果的な利用や、ドライバと巻線パラメータの整合は、非常に重要です。この章では、ステッピングモータ巻線の基本的な電気的特性について説明します。駆動構成および電流制御方法について、特に配慮しています。

巻線抵抗とインダクタンス

ステッピングモータの巻線は、銅線を複数回巻いたものから構成されています。銅線はプラスチックボビンに巻かれています。これによって、巻線、固定子、その他の機械的部品を別々に製造できます。製造の最終段階で、ボビンは固定子磁極に取り付けられます。

抵抗とインダクタンスは、コイルである巻線が持つ、2つの固有の物理的特性です。この基本的要素が実際のモータ性能を制限しています。巻線抵抗は、モータの電力損失と発熱の主な原因です。つまり、巻線とモータサイズおよび熱特性が、巻線の最大許容消費電力を制限しています。電力損失は次の式で与えられます。

$$P_R = R \cdot I_M^2$$

モータの効率を上げるには、定格消費電力で使用する必要があることに注意してください。モータが定格消費電力に満たないレベルで動作しているということは、たいていの場合、より安価な小サイズのモータで置換できます。インダクタンスはモータ巻線の電流変化に対する抵抗となるため、高速動作を制限します。図2にLR回路の特性を示します。巻線に電圧が印加されると、電流は次の式に従って上昇します。

$$I(t) = (V/R) \cdot (1 - e^{-t \cdot R/L})$$

初期的には、電流は次の率で増大します。

$$dI/dt(0) = V/L$$

上昇率は、電流が次の収束値に近づくにつれ減少します。

$$I_{MAX} = V/R$$

$T_e = L/R$ の値は、回路の電気的時定数として定義されます。 T_e は、電流が最終値の63% ($= 1 - 1/e$) に達するまでの時間です。LR回路が切り離され、 $t = t_1$ の瞬間に短絡されると、電流は低下し始めます。

$$I(t) = (V/R) \cdot e^{-(t-t_1) \cdot R/L}$$

初期の減少率は次の通りです。

$$I(t) = (V/R)$$

ステッピングモータをフルステップで動作させる時のように、巻線に矩形波の電圧が加えられると、電流の波形は円滑化されます。図3に3つの異なる周波数での電流を示します。一定の周波数(B)以上になると、電流は最大値(C)に達することはありません。モータのトルクは電流にほぼ比例しているため、最大トルクはステッピング周波数が増大するにつれ低下します。

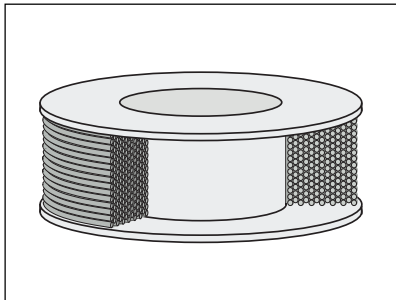


図1 典型的な永久磁石ステッピングモータの巻線

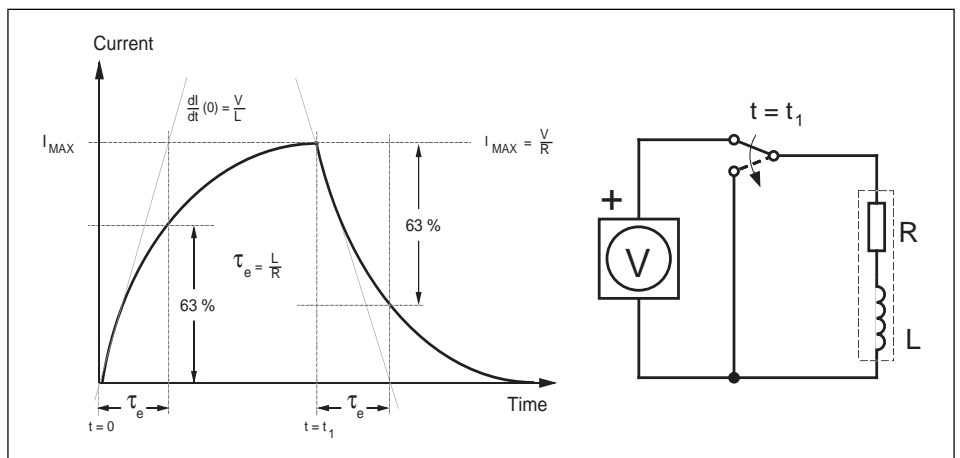


図2 誘導抵抗回路の電流波形

インダクタンスに打ち勝ってモータの高速性能を得るには、電流上昇率を増大させるか、または時定数を低下させるかの2つの方法があります。抵抗を増大させると電力損失も増大するため、高速性能を得るためにはV/Lの比率を増大させるのが理想です。巻線に電流を決める際、次のことを考慮する必要があります。

- ・できるだけ高い電圧を使用する
- ・インダクタンスの低いモータを使う

それによって、低インダクタンス/低抵抗のモータは、定格・最大許容電流が大きくなります。普通最大電流はドライバによって制限されているため、高性能化はドライバの選択に大きく依存することになります。モータの制限要素は消費電力であり、電流ではありません。モータを効率的に利用するには、消費電力を最大許容レベルにする必要があります。

基本巻線パラメータと寸法決定

最大許容消費電力 P_R および巻線に使える部分（すなわち銅体積）が一定である条件下では、変更可能なパラメータは銅線の巻数または直径です。別記の「巻数と線径の巻線パラメータへの影響」を参照してください。

駆動回路の機構

ステッピングモータ用ドライバ回路は、主に次の2つの機能があります。

- ・相巻線の電流と磁束の方向を変化させる。
- ・巻線に制御可能な量の電流を流し、優れた高速性能を得るためにできるだけ電流立ち上がり立ち下がり時間を短くする。

磁束方向の制御

ステッピングモータをドライブさせるには、各相で独立に磁束方向の変化が必要になります。磁束方向の変更は、電流方向を変化させることで行われます。これにはバイポーラドライブを使う方法とあるいはユニポーラドライブを使う方法の2通りがあります。図4は、これら2つの構成を示しています。2つの相は同様のため、片方のみ示しています。

巻数とワイヤ直径は巻線パラメータにどのように影響するか？

巻線の断面積をAとします。巻数の関数としての巻線の抵抗は、次の理想化された計算で得られます。

$$R = \rho \cdot l / a \quad \text{ここで、}$$

$a = A / n$, ワイヤの断面積;

ワイヤの長さ $l = 2\pi r \cdot n$; ρ は銅の固有抵抗です。

$$R = \rho \cdot 2\pi r \cdot n / (A / n) = 2\pi r \cdot \rho \cdot n^2 / A \approx n^2$$

抵抗は、ワイヤ巻数の二乗に比例します。

(単純化された) インダクタンスは、次のように計算できます。

$$L = 2\pi r^2 \cdot n^2 \approx n^2$$

インダクタンスは、ワイヤ巻数の二乗に比例します。

定格電流を計算するには、一定消費電力の条件を使用します。

$$P_R = R \cdot I_M^2$$

これは、次のようになります。

$$I_M = \sqrt{P_R / R} \approx \sqrt{P_R / n^2} \approx 1 / n$$

電流は、巻数に反比例します。

トルクは、磁束Fに比例します。磁束Fは巻線内のアンペア回数に比例します。

$$T \approx F \approx n \cdot I_M \approx n \cdot (1 / n) = \text{一定}$$

トルクは、巻数にかかわらず、一定の消費電力レベルでは一定です。

定格電圧は、次のようになります。

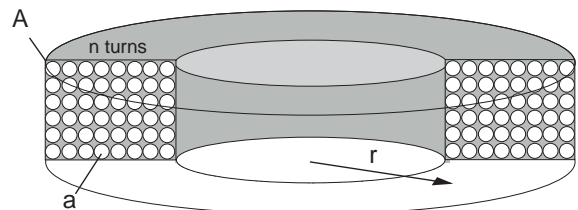
$$V_M = R \cdot I_M \approx n^2 \cdot (1 / n) \approx n$$

定格電圧は、巻数に比例します。

最後に、電気的時間定数は、次のようになります。

$$\tau_e = L / R \approx n^2 / n^2 = \text{一定}$$

時定数は、巻数に影響されません。



バイポーラドライブ

バイポーラドライブとは、一方の巻線の電流方向を、巻線端子両端の電圧極性を反転させることで変化させることを指します。極性を変化させるにはHブリッジが必要なため、合計で4つのスイッチが必要です。バイポーラドライブでは、1相当たり必要な巻線は1本です。2相モータは2本の巻線と、4つの接続リードをもつこととなります。

ユニポーラドライブ

ユニポーラドライブでは、中点をもつ1本の巻線、あるいは1相当たり2本の独立した巻線が必要になります。磁束の方向は、一方の巻線からもう一方の巻線に電流を流し換えることで反転されます。この方法では、1相当たり2つのスイッチのみ必要です。一方でユニポーラドライブでは、同時に利用可能な巻線の半分しか利用できません。したがって巻線での電力損失は、同じ出力電力のバイポーラドライブの2倍になります。

電流制御

トルクを制御し、巻線抵抗による消費電力を制限するには、電流を制御または制限する必要があります。また、ハーフステップではゼロ電流レベルを設ける必要があります。マイクロステップでは連続かつ可変の電流が必要になります。ここでは、電流を制限する2つの原理、抵抗制限ドライブとチョップドライブについて説明します。これらはいずれも、バイポーラドライブ、ユニポーラドライブどちらも実現できます。

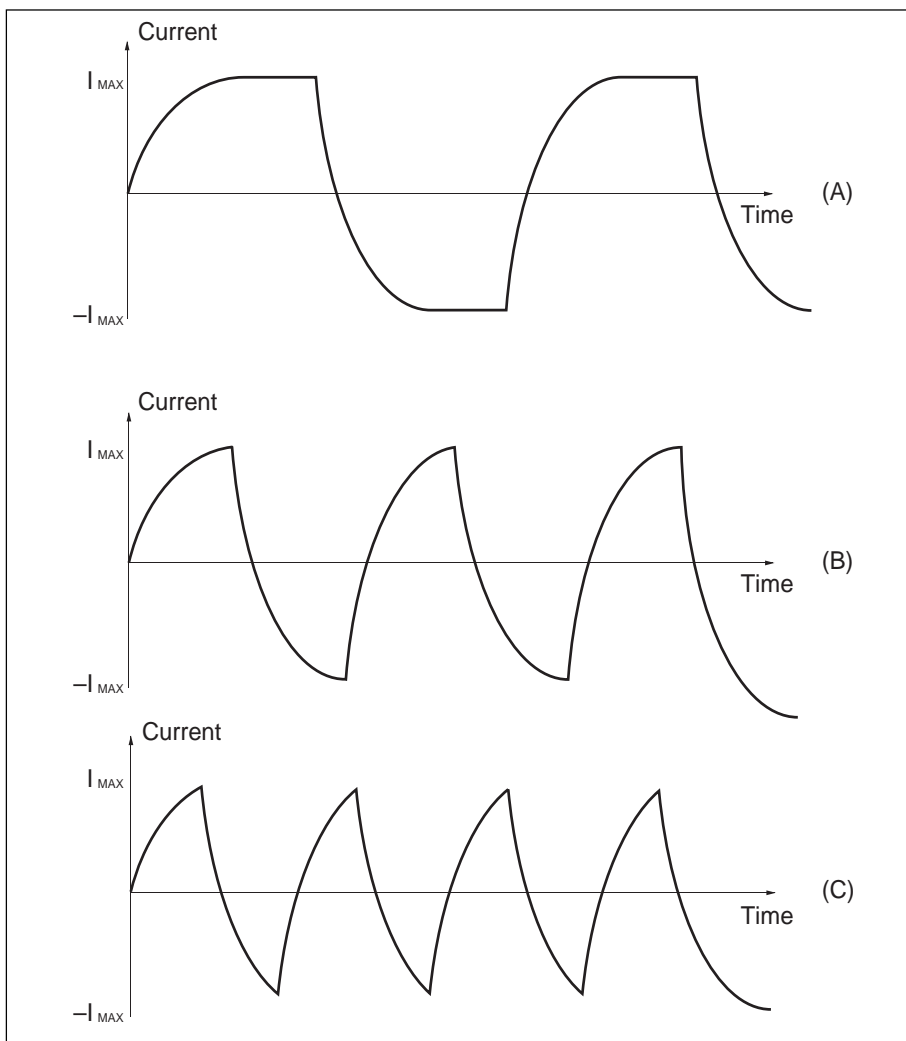


図3 誘導抵抗回路の電流波形

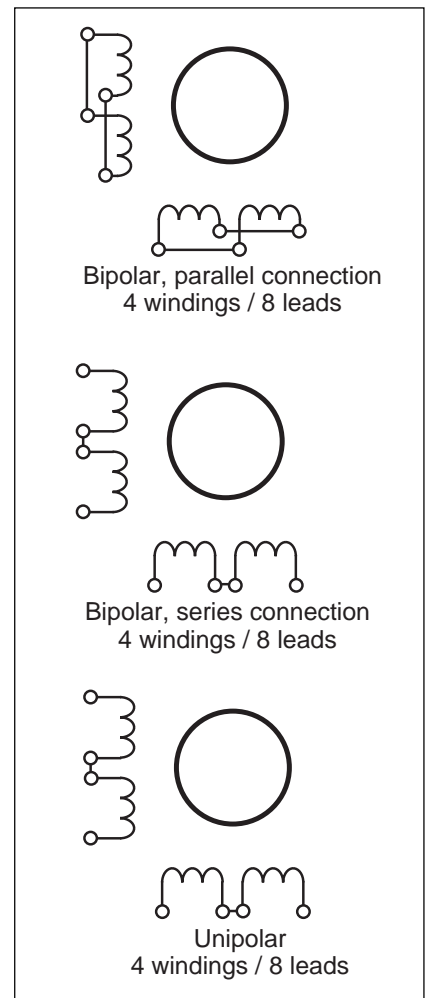
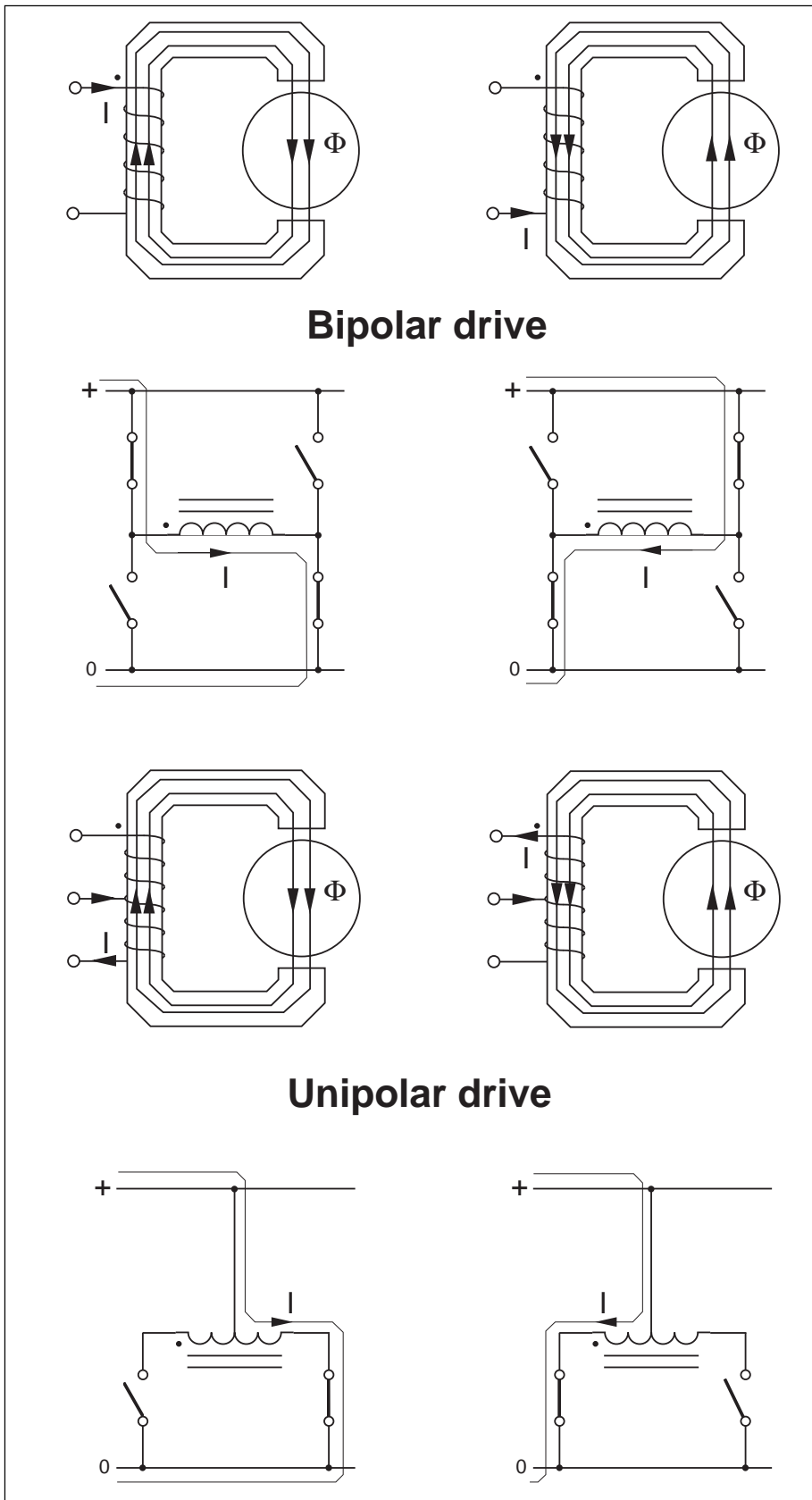


図4 フェーズ巻線内の電流および磁束の方向を制御するバイポーラおよびユニポーラドライブ機構

図5 8リードモータを使用した、バイポーラおよびユニポーラドライブ用のさまざまな巻線構成

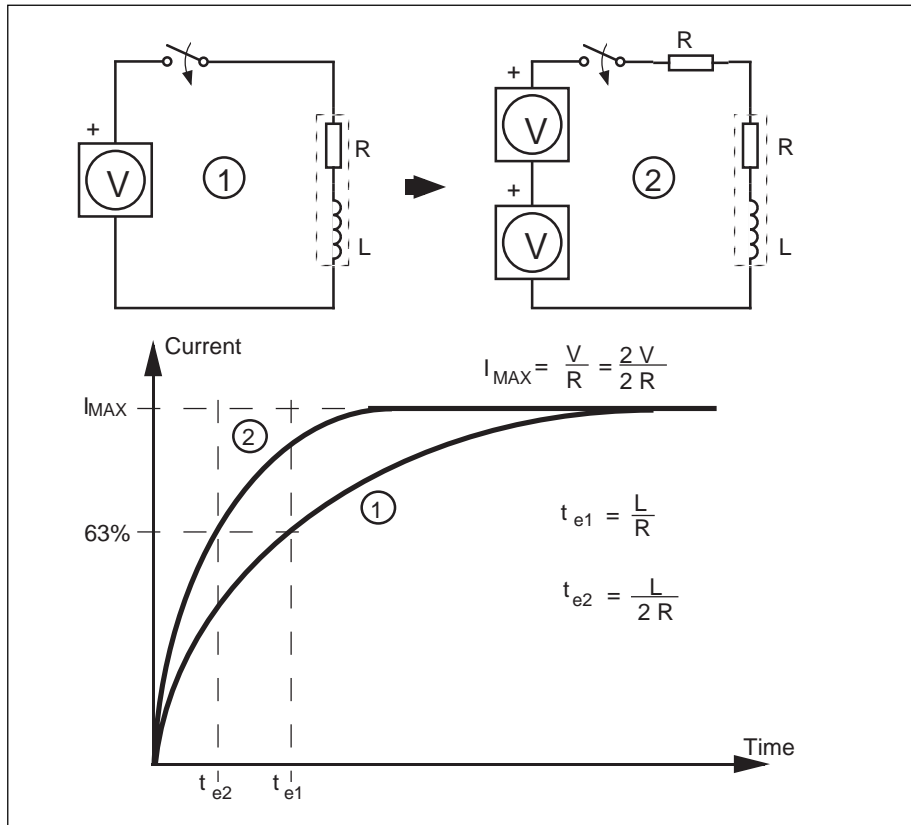


図6 電流の抵抗制限

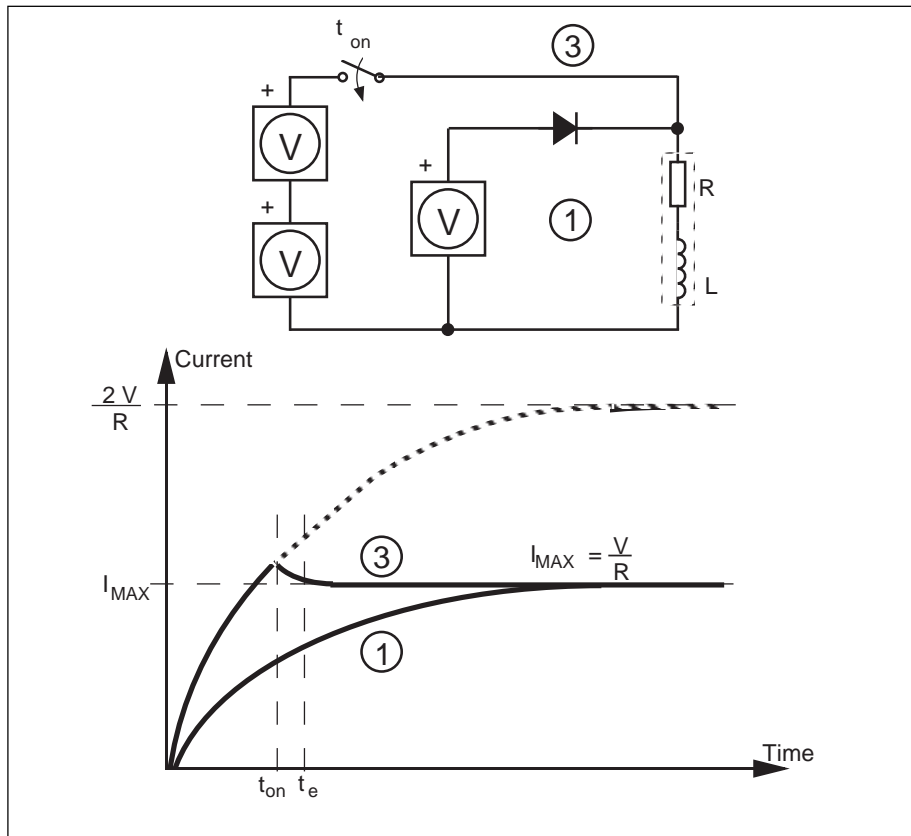


図7 バイレベルドライブ

電流の抵抗制限 (L/Rドライブ)

これは基本的な方法で、電流は電源電圧と巻線抵抗、さらに必要な場合は外部抵抗 (電圧降下抵抗) によって制限をかけます。

$$I_M = V_{\text{supply}} / (R + R_{\text{ext}})$$

規定のモータ電圧が電源電圧と同じならば、 R_{ext} を削除できます。電源電圧を上昇させることで高速性能が向上します。抵抗制限ドライブで電源電圧を増大させる場合、巻線に直列に追加抵抗 (R_{ext}) を接続して、電流を定格レベルに制限する必要があります。次の式に従って、時定数が低下し、電流立ち上がり時間が短くなります。

$$T_e = L / (R + R_{\text{ext}})$$

図6を参照してください。この方法を使用すると、追加した外部抵抗での電力損失を伴います。通常は数ワット消費されるため、損失分を補う必要があります。大きな電力用抵抗、放熱の考慮、および電源が占める大きなスペースによって費用対効果が減少するため、L/Rドライブ機構は定格で約1~2ワットの小型モータに限定されてしまいます。

バイレベル (2電源) L/Rドライブ

バイレベルL/Rドライブは、抵抗の使用による無駄な電力への対策となります。電流立ち上がり期間の最初に、巻線は第2の高電圧電源に接続されます。電流が規定レベルに達したとき、第2の電源を切断します。図7で詳細を記載します。バイレベルドライブの短所は、第2の電源が必要なことです。5Vと同時に12Vや24Vなどが利用可能な用途では費用対効果が高い方法ですが、利用できない場合は費用がかかります。また電源には倍電圧電源などを使用することもできます。

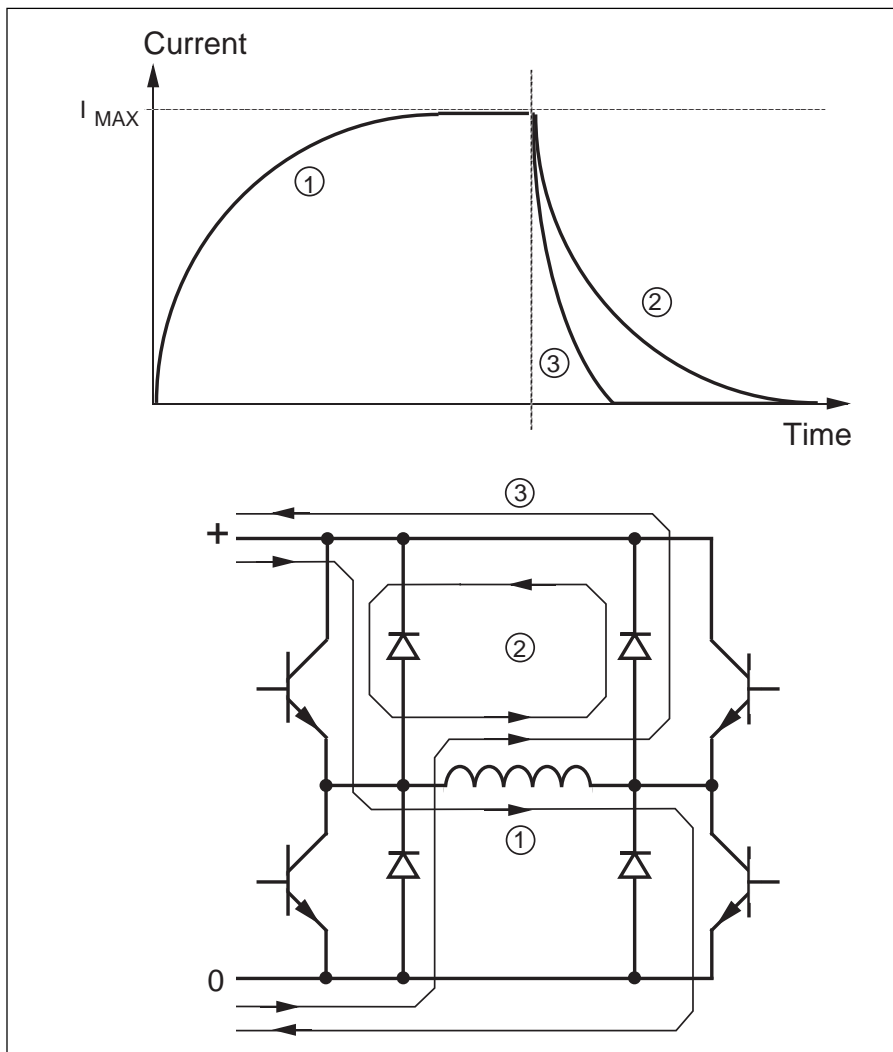


図8 バイポーラドライブの電流路

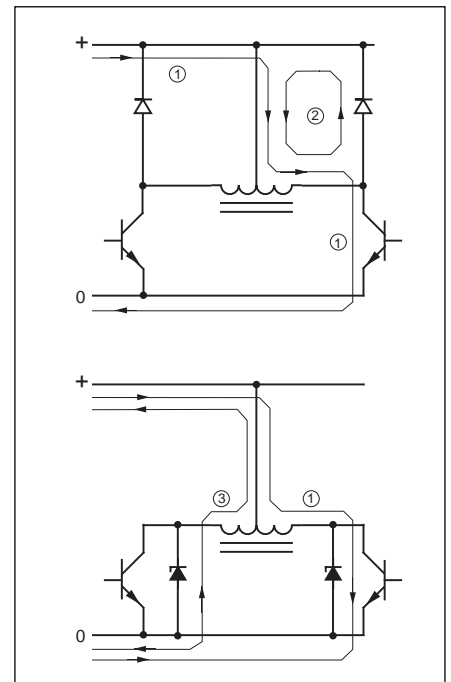


図9 ユニポーラドライブの電流路

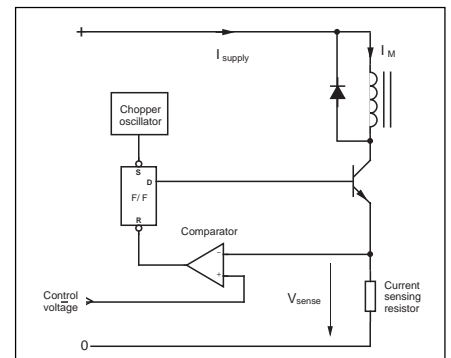


図10 一定電流チョップ調整の原理を示す概略図

電流経路

もう一つ、非常に重要な点として、ターンオフ時および相切替時の電流経路があります。巻線にはインダクタンスによる誘導作用があるため、常に電流経路が存在している必要があります。スイッチとしてトランジスタを使用する場合は、ダイオードを追加して、スイッチを通った電流が両方向に流れるようにする必要があります。バイポーラドライバの場合は、図8に従って、各スイッチに対して1つ、合計4つのダイオードによって電流経路が得られます。電流をオフにする方法は、すべてのトランジスタをオフにするか（経路3）、または導通している2つのトランジスタのうち一方のみオフにするか（経路2）の2つがあることに注意してください。前者の方法では、巻線インダクタンスに蓄積されたエネルギーは高電圧V_{supply}に放出されるため、高速電流減衰になります。後者の方法では、逆電圧は2つのダイオードおよび巻線抵抗の電圧降下だけで電圧が低いため、低速電流減衰になります。相切替時には、オンしていたトランジスタが両方オフになるため、電流は急速に減衰します。高速なハーフステップでは、ハーフステップ位置での電流が急速に0へ減衰することが重要になります。ユニポーラドライバの電流経路はより複雑になります。その理由は、少量の漏れインダクタンスを除き、各相巻線の半分同士が完全に結合するからです。図9にいくつかの電流経路の例を示します。結合が起こることで、巻線のスイッチング時に電源の2倍にも達する大きな電圧の変動が起こります。トランジスタスイッチは電源電圧よりかなり高い電圧が印加されます。漏れインダクタンスもこの電圧変化の原因になります。このため、トランジスタスイッチはスナバ回路かツェナーダイオードで保護する必要があります。

チョップパ制御

チョップパドライバは、電流制御、電流立ち上がりと反転の高速化に最適な方法です。基本的な考え方は、モータの標準電圧の数倍の電源電圧を使用するというものです。初期値がV/Lの電流立ち上がりは大幅に増大します。比率V_M/V_{supply}は、オーバードライブ率と呼ばれます。チョップパのデューティを制御することで、標準のモータ電圧および電流と等しい平均電圧と平均電流が生成されます。チョップパは通常、定電流制御ができるように設定されます。図10～12を参照してください。定電流制御は、巻線への出力電流を切り替えることで実現されます。これは、モータ巻線と直列接続された電流検出抵抗によって、巻線を通るピーク電流を検出することで動作します。電流が増大すると、検出抵抗両端で電圧が発生し、これがコンパレータに帰還されます。基準入力であらかじめ決定された電圧レベルで、コンパレータはフリップフロップをリセットし、これによって出力トランジスタがオフになります。電流は、クロック発振器がフリップフロップをトリガするまで低下します。これによって出力トランジスタが再びオンになり、このサイクルが繰り返されます。

定電流制御の長所は、電源電圧の変動に関わらず、発生するトルクを正確に制御できることです。また、最も短い電流の立ち上がりおよび反転時間が得られます。消費電力および消費電流は最小になります。消費電流はモータ電流と同じではなく、停止時におけるモータ電流にデューティサイクルをかけたもので、一般に次のようになります。

$$I_{\text{supply}} = I_M \cdot (V_M / V_{\text{supply}})$$

図12は、定電流チョップパとして設定されたHブリッジを示しています。ターンオフ期間中にHブリッジを切り換える方法によって、電流は1つのトランジスタと1つのダイオードを通して回生し（経路2）、低速電流減衰になるか、または電源を通して回生するか（経路3）のどちらかになります。電源に電力を帰還する利点は、高速電流減衰と、低い電流レベルに急速に減少する能力です。例として、巻線電流が負の傾きでのマイクロステップがあります。これは、傾きが必要とするより電流減衰率が低い場合はマイクロステップ本来の性能が引き出せません。高速電流減衰の短所は、電流リップルが増大し、モータ内で鉄損が発生することです。高速/低速電流減衰の概念の詳細な説明については、「ハーフステップの技法」および「マイクロステップ」を参照してください。

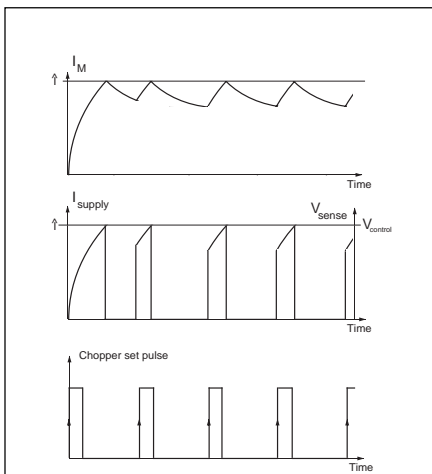


図11 基本的なチョップパ回路の電流波形

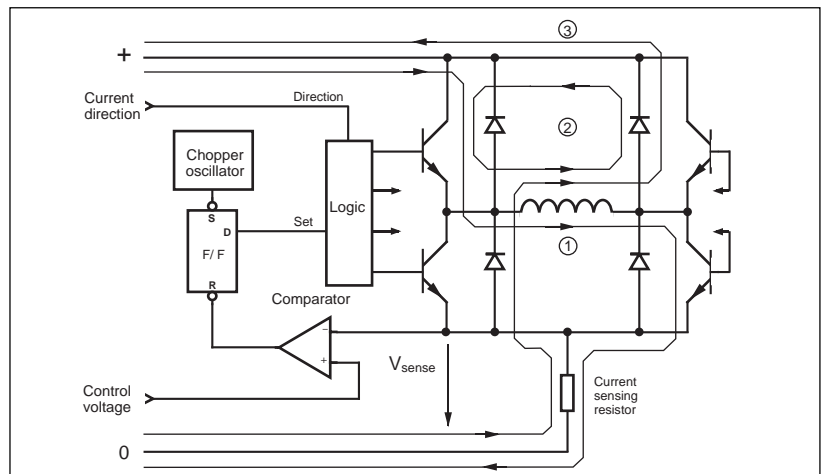


図12 一定電流チョップパとして構成されたHブリッジ