

Orientalmotor

TECHNICAL MANUAL

テクニカルマニュアル
ブラシレスモーター編



もくじ

まえがき	5
------------	---

1

ブラシレスモーターの種類.....	7
1.1 インナーローター型.....	7
1.2 アウターローター型.....	7
1.3 ディスクローター型.....	8

2

ブラシレスモーターの構造と原理.....	9
2.1 DCモーターの構造と回転原理.....	9
2.1.1 DCモーターの構造	9
2.1.2 DCモーターの回転原理.....	9
2.1.3 DCモーターの特性	11
2.1.4 DCモーターの特徴	12
2.2 ブラシレスモーターの構造と回転原理.....	13
2.2.1 ブラシレスモーターの構造.....	13
2.2.2 ブラシレスモーターの回転原理	13
2.2.3 ブラシレスモーターの特性.....	15
2.2.4 ブラシレスモーターの特徴.....	16
2.3 ブラシレスモーターの主な部品.....	17
2.3.1 磁極検出用の部品.....	17
2.3.2 磁界を発生させる部品.....	19

3

ブラシレスモーターの駆動方式	21
3.1 モーターの駆動方式.....	21
3.1.1 矩形波駆動方式 (120°通電方式)	21
3.1.2 正弦波駆動方式	21
3.1.3 各駆動方式の電流波形	22
3.2 駆動方式とモータートルク	23
3.2.1 矩形波駆動方式の場合	24
3.2.2 正弦波駆動方式の場合	25
3.3 電流の制御方法.....	26
3.3.1 変調方法	26
3.3.2 正弦波駆動方式の変調方法.....	27

4

ブラシレスモーターの制御原理	29
4.1 基本的な駆動回路の構成と役割.....	29
4.1.1 電源回路 (コンバータ部)	29
4.1.2 速度制御器.....	29
4.1.3 速度変換器.....	30
4.1.4 励磁信号発生器	30
4.1.5 電圧制御器.....	30
4.1.6 出力回路 (インバータ部)	30
4.2 速度制御方法.....	31
4.3 高精度な駆動回路の構成と役割.....	32
4.3.1 電流検出器.....	32
4.3.2 ローター角演算器.....	32
4.3.3 電流制御器.....	32
4.4 トルクの制御方法	33
4.5 制動 (回生運転)	33

もくじ

5

ブラシレスモーターに用いられている技術 35

- 5.1 広い速度制御範囲(低速運転) 35
 - 5.1.1 低コギング設計 35
 - 5.1.2 正弦波駆動 36
 - 5.1.3 速度検出精度 37
- 5.2 広い速度制御範囲(高速運転) 38
 - 5.2.1 位相制御による出力トルク補正 38
 - 5.2.2 ベクトル制御 39
 - 5.2.3 弱め界磁制御 42
- 5.3 高精度な速度制御 43
 - 5.3.1 速度変動率 43
 - 5.3.2 高信頼性 44
- 5.4 安定した停止位置 45
 - 5.4.1 オーバーラン量 45
 - 5.4.2 オーバーラン量のばらつき 46
 - 5.4.3 ACスピードコントロールモーター
の制動方法 46
 - 5.4.4 ブラシレスモーターの制動方法 47
- 5.5 高効率・省エネルギー 48
 - 5.5.1 モーター損失 48
 - 5.5.2 銅損 48
 - 5.5.3 鉄損 50
 - 5.5.4 漂遊負荷損 51
 - 5.5.5 機械損 51
- 5.6 モーターが小型で軽量 52

あとがき 53

まえがき

私たちの身の回りには、家庭内、商業施設、飲食店、車、工場などあらゆる場所でモーターが使われ、私たちの生活を支えています。直接目に触れることはまれですが、物が動くところには機能や性能が異なるさまざまなモーターが使われています。本テクニカルマニュアルでは、数あるモーターの中からブラシレス DC モーターについて解説します。

ブラシレス DC モーターは、速度の制御性や省エネルギー性能に優れたモーターです。誘導電動機をインバータや位相制御で速度制御した場合に比べて、低速回転から高速回転まで幅広い速度範囲で使用できます。また、ローターに永久磁石を使用しているので、誘導電動機のようにローターに電流を誘導する必要がないため、小型で高出力、高効率のモーターです。

しかし、モーターに永久磁石を使用していることと、モーターを動かすために磁極検出器と専用の駆動回路が必要であるため、コストが高く用途が限られていました。

近年では、電子デバイスの発展とともに電子部品の集積化が進み、駆動回路が低コストでコンパクトにできるようになりました。さらに、地球温暖化対策として省エネルギーの要求が高まったことで、エアコンや冷蔵庫、洗濯機などの省エネルギー家電、電気自動車やハイブリッドカーの駆動、車載電装用モーターなどに広く普及しています。

小型で高出力の特長を生かして、パソコンの冷却ファン、ディスクドライブ装置やドローンなど幅広い用途で使われるようになってきています。

本テクニカルマニュアルでブラシレス DC モーターの原理、特徴を理解していただき、AC スピードコントロールモーターやインバータなど、他の速度制御用モーターと使い分ける参考になれば幸いです。

本文に入る前に、ブラシレス DC モーターやその原型である DC モーターの成り立ちについて触れておきます。

モーター技術実用ハンドブック（日刊工業新聞社）によると、モーターの原型と呼べるものは、1834 年に Jacobi（ロシア）による回転磁石型直流モーターの発明であろうといわれています。当初のモーターは、コイルを単純に集中巻きて電磁石を利用することから始まりました。その後、フェライト磁石に代表される永久磁石が開発されたことで、小型モーターでは電磁石界磁型 DC モーターから永久磁石界磁型 DC モーターが一般的になり、現在でも広く普及しています。

DC モーターの大きな課題である整流子とブラシ間の火花発生やメンテナンス、寿命などの改善策として、機械的接点であるブラシ、整流子を電子回路に置き換えるという発想は古くからありました。しかし、パワーエレクトロニクス技術がなかったことから、励磁切り替えのタイミング調整がうまくできませんでした。1960 年代になると、エレクトロニクスの進歩により、ブラシと整流子をトランジスタのスイッチングに置き換えたモーター「無整流子電動機」または「コミュテーターレスモーター (Commutatorless motor)」として出現しました。このモーターは商品名なども考慮され、やがて「ブラシレス DC モーター (Brushless DC motor)」や「EC モーター (Electronically commutated motor)」として特性改善や構造、形状の変更を行ってきましたが、その原理は「同期モーター (Synchronous motor, SM)」そのものであり、この区別は不鮮明となっています。

「ブラシレス DC モーター」の電源には、AC、DC 電源の両方があります。「ブラシレス DC モーター」という呼び名は、DC 電源で動かすモーターというイメージが強いため、当社では「ブラシレスモーター」と呼んでいます。

1 ブラシレスモーターの種類

ブラシレスモーターは、永久磁石、巻線、検出器、駆動回路を組み合わせてモーターとしての機能を発揮できます。構造的な制約が少ないため、用途に合わせて最適な構造の専用モーターが考案されてきました。その中から、代表的な構造と特徴について説明します。

1.1 インナーローター型

ステーター(固定子)の内側にローター(回転子)があり、その表面に永久磁石を配置しています。ローターが細く慣性モーメントが小さいので、加速、減速時の応答性が優れています。また、ステーターの位置がモーター表面に近いので、放熱性が良く小型で高出力なモーターです。

この形状はブラシレスモーターとして一般的で、幅広い用途に使われています。当社のブラシレスモーターはインナーローター型です。

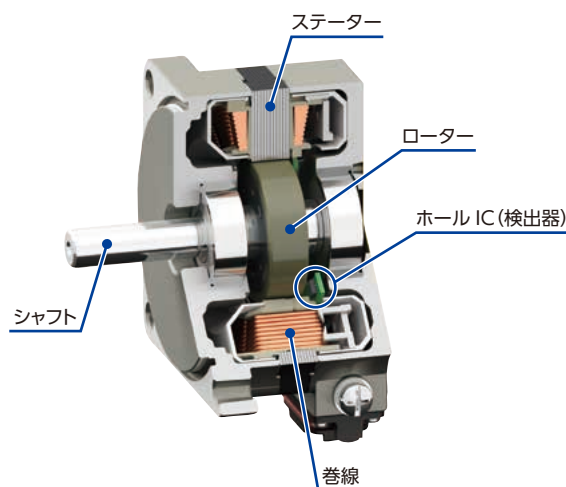


図 1.1 インナーローター型

1.2 アウターローター型

ステーターと永久磁石の位置はインナーローター型とは逆で、ステーターの外側にローターがあり、その内面に永久磁石を配置しています。カップ形状のローターは慣性モーメントが大きいため、加速、減速時の応答性が悪く俊敏な動きには不向きですが、速度安定性に優れています。一定の速度を保って回転するブラシレス DC ファンに使われています。

ローター径が大きいためインナーローター型より多くの磁石を配置でき、磁石の多極化が可能です。このため、小型で高出力を出すことができます。しかし、巻線が内部に配置されており放熱性が低いため、巻線の温度が上がりやすく運転時間に制限がありました。アウターローターを採用しているドローン用のモーターでは、ローターカップに通風用の穴を設け、プロペラの風で巻線を冷却しています。

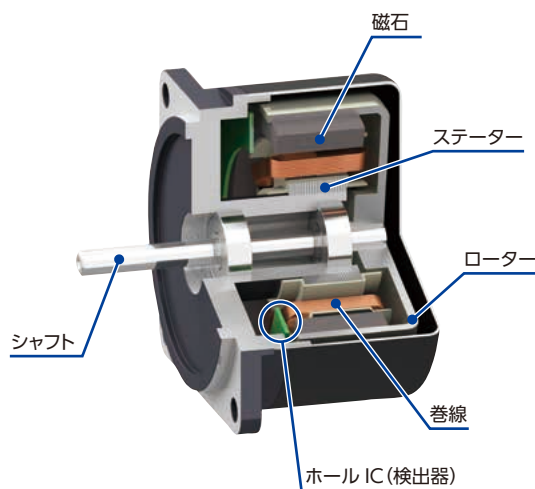


図 1.2 アウターローター型

1.3 ディスクローター型

回路基板上に巻線や検出器が実装され、ステーターを構成しています。ステーターと向かい合うように板状の永久磁石をローター表面に配置しているため、厚さの薄いモーターです。軽負荷で安定した一定の速度を保って回転するような用途に適しています。シャフトはなく、ローター上にワーク脱着用のアタッチメントを取り付けて使用します。

ハードディスクドライブやDVD、ブルーレイなどのディスクドライブ装置で使用されています。

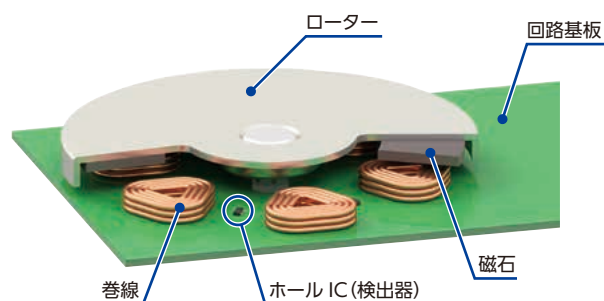


図 1.3 ディスクローター型

2 ブラシレスモーターの構造と原理

2.1 DC モーターの構造と回転原理

ブラシレスモーターの説明に先立って、ブラシレスモーターの原型である DC モーターの構造と回転原理を紹介します。DC モーターとは、直流モーター (Direct-current motor) の短縮形で、名前のとおり直流電圧を印加することで回転するモーターです。

2.1.1 DC モーターの構造

一般的な DC モーターの構造を図 2.1 に示します。

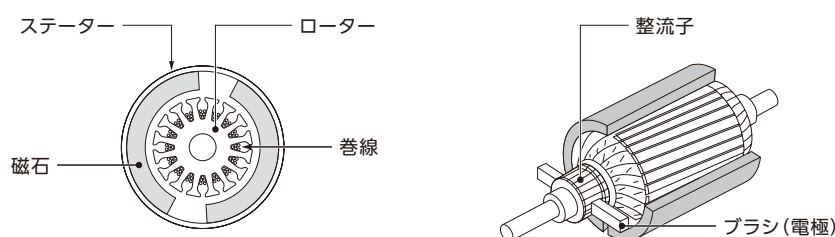


図 2.1 DC モーターの構造

ステーター（固定子）に永久磁石が取り付けられ、その中央に巻線を施したローター（回転子）が配置されています。ローターには複数の巻線があり、その両端は整流子（コミュテータ）に接続されています。ブラシ（電極）と接触した整流子を通して巻線に電流が流れます。ローターが回転すると、ブラシと整流子が切り替わり、電流が流れる巻線も順番に切り替わることで回転を続ける構造になっています。

2.1.2 DC モーターの回転原理

DC モーターの回転原理について、図 2.2 のフレミングの左手の法則と図 2.3 の簡易モデルを使って説明します。

磁界の中に配置された導体に電流を流すと、導体は力（電磁力）を受けます。フレミングの左手の法則に従って、磁界の向き、電流の向きと電磁力の向きがそれぞれ直交する関係になります。

このとき発生する電磁力は、磁界の強さ、透磁率、電流値に比例します。透磁率 μ は物質の磁化のしやすさを表す係数で、磁界の強さ H と透磁率 μ の積を磁束密度 B と呼びます。

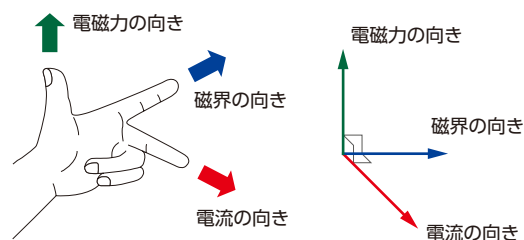


図 2.2 フレミングの左手の法則

図 2.3 の簡易モデルでは、N 極、S 極が向かい合うように 1 対の永久磁石が配置されています。永久磁石の間に 1 巻の巻線があり、一点鎖線を軸にして自由に回転できる構造になっています。

巻線の両端には整流子がつながっており、その整流子とブラシが接触しています。ブラシには直流電源を配線しており、そのプラス側（正極）から電流が供給されて、巻線を通してマイナス側（負極）へ帰還します。

図 2.3 に示した巻線の向きを起点 (0°) としてモーターの回転原理を説明します。

1. 磁界の中に配置された巻線にブラシと整流子を通して電流 i が流れます。
2. フレミングの左手の法則に従って、N 極側の導体には上方向に、S 極側の導体には下方向に電磁力 F が働き、巻線は時計方向に回転します。

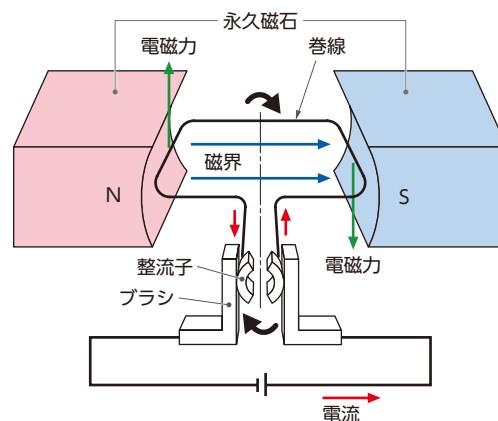


図 2.3 DC モーター簡易モデル

3. 巻線が回転して 90° 近く図 2.4 になると、整流子とブラシが接触しなくなり、電流が流れない状態になります。電流は流れていませんが、巻線は慣性で回転します。

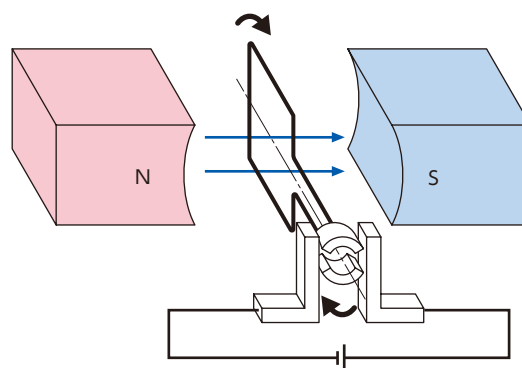


図 2.4 90° 回転した状態

4. 巻線が慣性で回転すると、再び整流子とブラシは接触し電流が流れて電磁力が発生します。 180° の位置、図 2.5 まで回転すると図 2.3 と同じ状態になります。

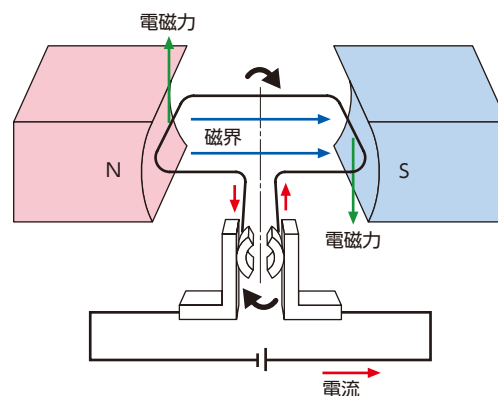


図 2.5 180° 回転した状態

以上のように DC モーターは、ブラシと接触する整流子が切り替わることで巻線に流れる電流の向きが切り替わり、巻線に一定方向の電磁力が働くようにすることで回転を続けます。巻線に流す電流の向きを変えることを転流といいます。



モーターのトルク

導体に発生する電磁力 F と磁束密度 B 、電流 i には以下の関係があります。

$$F = i B l \quad (2.1)$$

l : 磁界を横切る導体の長さ

また、回転軸の中心から導体までの距離を r とすると、巻線は導体 2 本分と考えられるため、回転軸に働くトルク T は

$$T = 2 F r \quad (2.2)$$

となります。

式 (2.1)、式 (2.2) からモーターの発生トルクは次式で表されます。

$$\begin{aligned} T &= 2 i B l r \\ &= Kt i \end{aligned} \quad (2.3)$$

Kt : トルク定数

トルク定数 Kt はモーター固有の値です。式 (2.3) から DC モーターのトルクと電流は比例関係があります。

2.1.3 DC モーターの特性

DC モーターの回転速度－トルク特性を図 2.6 に示します。無負荷（シャフトに何も負荷を加えていない状態）で最大速度となり、負荷トルクが大きくなると回転速度は下がります。モーター速度がゼロ（シャフトが固定された状態）で最大トルク（ストールトルク）を発生します。

このような右下がりの特性を垂下特性といいます。実際に DC モーターを使用する場合は、この特性上で負荷トルクとモーターの出力トルクが釣り合った点で回転します。たとえば、電圧 V_1 のときに T_L の負荷トルクが加わった場合は、 N_1 の速度で回転することになります。

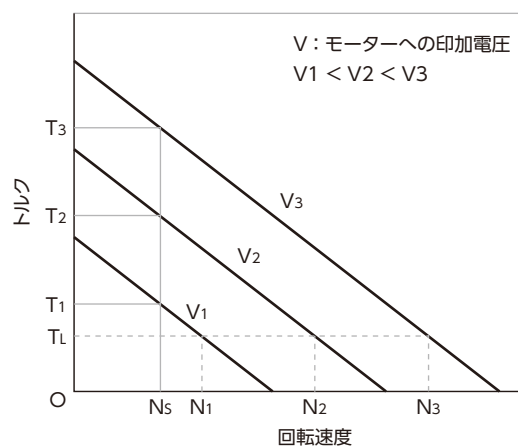


図 2.6 回転速度－トルク特性

また、式 (2.3) で示したように、発生トルクは電流に比例する特性があります。このため、印加電圧を $V_1 \rightarrow V_2 \rightarrow V_3$ と上げていくと、モーター電流が増加して回転速度－トルク特性が変化します。負荷トルクが T_L で一定の場合に印加電圧を V_1 から V_2 、 V_3 と変化させると、回転速度が N_1 から N_2 、 N_3 と変化します。印加電圧が V_1 で負荷トルクが T_1 から T_2 または T_3 に増えるとモーターは停止してしまいますが、印加電圧を V_1 から V_2 、 V_3 にするとモーターの発生トルクが T_2 、 T_3 になるため、回転速度は N_s の一定の速度で運転することができます。

2.1.4 DC モーターの特徴

ブラシ付き DC モーターの特徴を以下に示します。

• 長所

- リード線が 2 本で、直流電圧を印加するだけで回転する。
- 電源の極性を反転させると回転方向が反転する。
- 永久磁石を使っているので、小型、軽量で、効率が良い。
- 起動トルクが大きく制御性が良い。
- 電圧（電流）に対してトルクが比例する。
- 乾電池やバッテリーで駆動できる。
- 低価格

• 短所

- ブラシの摩耗により寿命が短い。
- 機械的な摺動音が発生する。
- 電氣的なノイズが発生する。

DC モーターは、DC 電源を接続するだけで簡単に使えるため多種多様な用途で使用されているモーターです。しかし、ブラシと整流子の摺動によりブラシが摩耗するため、摩耗粉の清掃やブラシの交換など定期的なメンテナンスが必要になります。モーターの使用台数が多くなるとメンテナンスの手間が大変なので、メンテナンスフリーで長寿命のモーターが求められるようになりました。

2.2 ブラシレスモーターの構造と回転原理

DC モーターが持つ制御性の良さはそのまま維持し、デメリットの原因であるブラシと整流子を電子部品に置き換えたモーターが、ブラシレスモーターです。ここでは、ブラシレスモーターの構造、回転原理の違いについて説明します。

2.2.1 ブラシレスモーターの構造

ローター(回転子)には永久磁石、ステーター(固定子)には巻線(コイル)が配置されており、図 2.1 に示した DC モーターのステーターとローターを逆にした構造になっています。DC モーターは、巻線に直流電流を流すとローターが回転を始め、ブラシと接触する整流子の位置が変わることで巻線に流す電流の向きが変わり(転流)、回転を続けます。

ブラシレスモーターはブラシと整流子を使わずに転流を実現するために、永久磁石の磁極位置を検出する検出器(ホール素子、ホール IC など)と、検出した磁極位置に合わせて巻線に電流を流すための駆動回路(ドライバ)が必要です。

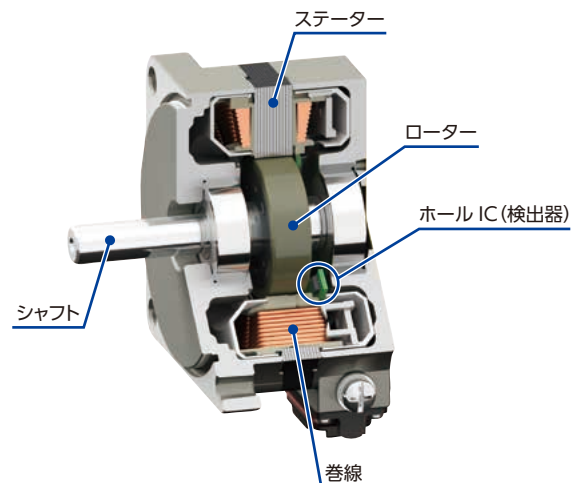


図 2.7 ブラシレスモーターの構造

2.2.2 ブラシレスモーターの回転原理

ブラシレスモーターの回転原理を、図 2.8 に示した 3 相 2 極の簡易モデルを使って説明します。

ローター磁石は、N 極、S 極ともに 180° の磁極角を持っています。検出器 Ha、Hb、Hc は 120° 間隔で配置されており、ローター磁石の N 極を検出して信号を出力します。

ステーターは、U 相巻線、V 相巻線、W 相巻線が 120° 間隔で配置され、検出器とは 60° ずれて配置されています。

ステーター各相の巻線は、駆動回路からモーターへ電流が流れたときにステーター内径側に S 極が発生します。また、モーターから駆動回路へ電流が流れたときにステーター内径側に N 極が発生する向きに巻線が施されています。図 2.8 は U 相から V 相に電流を流した状態を示しています。

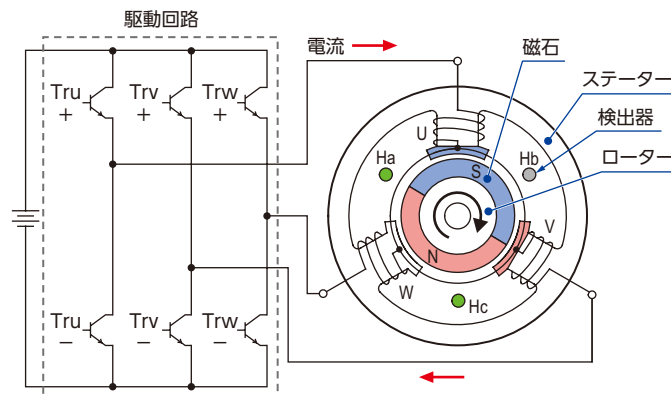


図 2.8 ブラシレスモーターの簡易モデル

図 2.8 に示したローター磁石の向きを起点 (0°) として、図 2.9 の回転シーケンスを使ってモーターの回転原理を説明します。

1. (a) の区間では、検出器 Ha と Hc が N 極を検出し信号を出します。この場合、トランジスタ Tru+ と Trv- を ON にすると、ステーター巻線の U 相から V 相に電流が流れます。このとき、U 相は S 極、V 相は N 極に磁化され (励磁)、それぞれローター磁石の N 極、S 極と吸引力、反発力を発生してローターは時計方向に回転します。
2. 60° を超える (b) の区間では、検出器 Ha だけが N 極を検出し信号を出します。この場合、トランジスタ Tru+ と Trw- を ON にすると、ステーター巻線の U 相から W 相に電流が流れます。このとき、U 相は S 極、W 相は N 極に励磁され、それぞれローター磁石の N 極、S 極と吸引力、反発力を発生してローターは時計方向に回転を続けます。
3. ローターが 60° 回転するごとに、検出器 Ha、Hb、Hc の ON と OFF の組み合わせが変わります。モーターが 1 回転する中に、検出器出力の組み合わせは (a) ~ (f) の 6 パターンあります。パターンごとに決められた励磁相が順次切り替わることで、連続的に回転磁界を発生します。

また、検出器 Ha、Hb、Hc 出力の組み合わせに対して、コイルに流す電流の流し方を変えることでモーターの回転方向を逆にすることができます。

たとえば、上記 2. (b) の区間で、検出器 Ha だけが N 極を検出し信号を出したときに、トランジスタ Trv+ と Tru- を ON にすると、ステーター巻線の V 相から U 相に電流が流れます。このとき、U 相は N 極、V 相は S 極に励磁され、それぞれローター磁石の S 極、N 極が引き合ってローターは反時計方向に回転します。

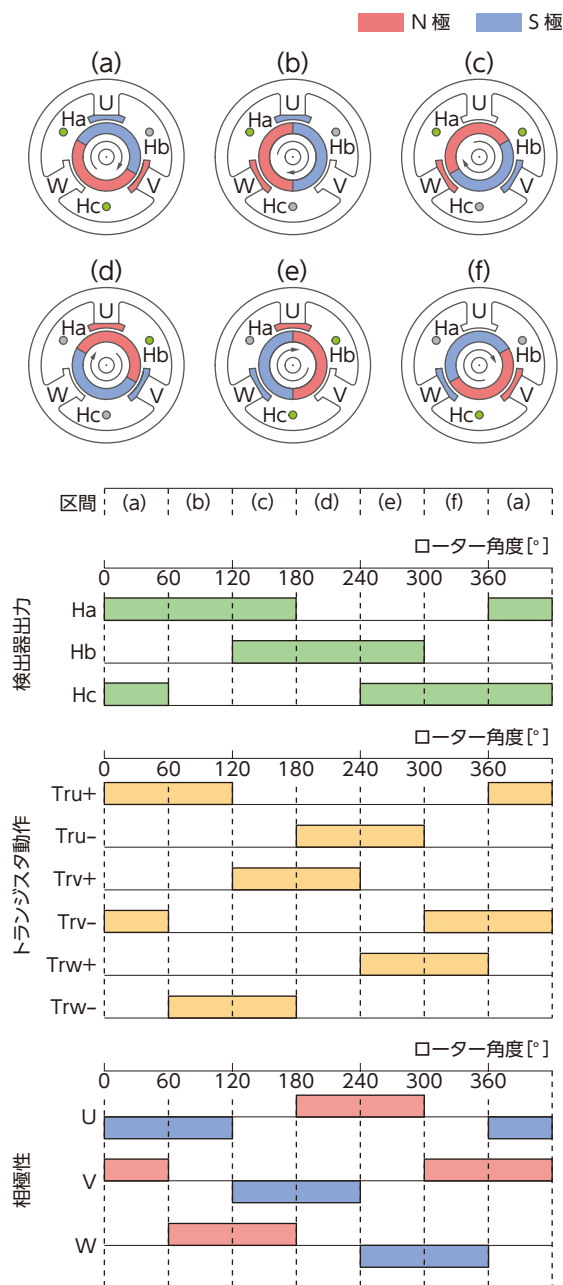


図 2.9 回転シーケンス

以上のように、ブラシレスモーターは、ローター磁極検出器の信号に合わせてステーター巻線に電流を流すことで回転します。



ブラシレスモーターの電流

ブラシレスモーターの駆動回路には直流電圧が印加されていますが、モーターには交流の電流が流れています。そのため、ブラシレスモーターを交流同期型モーターと呼ぶこともあります。

2.2.3 ブラシレスモーターの特性

ブラシレスモーターは、「2.2.1 ブラシレスモーターの構造」で述べたように、DC モーターのステーターとローターを逆にした構造です。そのため、ブラシレスモーターの基本的な回転速度－トルク特性は、図 2.10 のような DC モーターと同様の垂下特性になり、モーターは負荷トルクと釣り合った回転速度で回ります。

速度が遅くなるとモーターの発生トルクは大きくなりトルクに比例した電流が流れます。大きな電流が流れるとモーターの永久磁石の磁力が低下したり（減磁）、巻線の発熱が大きくなり焼損にいたる場合があります。また、駆動回路の出力素子や電源回路も大電流に対応したものが必要になり、駆動回路が大型で高価になってしまいます。

速度が速くなると、モーターの発生トルクが小さくなり、駆動できる負荷トルクが小さくなって実用に適しません。さらに高速で運転すると、モーターと組み合わせるギヤヘッドの騒音増加や潤滑不足により寿命に影響します。

以上のことから、ブラシレスモーターは、駆動回路でモーターに流す最大電流や最大回転速度を制限しています。そのため、当社製品のカタログに記載している回転速度－トルク特性図は図 2.11 のような形になっています。

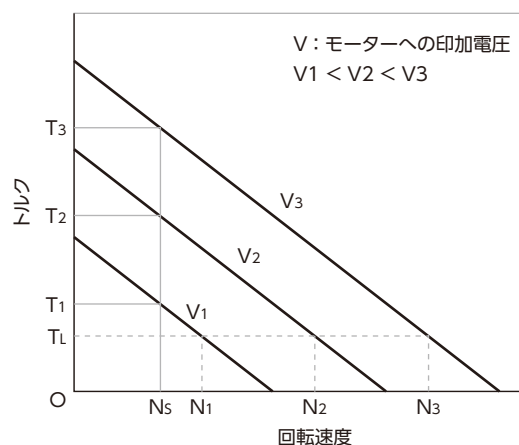


図 2.10 回転速度－トルク特性

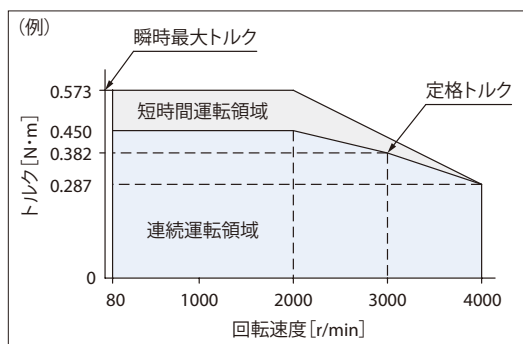


図 2.11 回転速度－トルク特性

短時間運転領域
短時間でであれば使用することができる回転速度とトルクの組み合わせの領域。加速、減速時の応答性を良くするために使用する。

連続運転領域
連続運転で使用することができる回転速度とトルクの組み合わせの領域。



ローター磁石の減磁

磁石材料に強力な磁界を与えることで永久磁石は磁化されます。逆に、モーターに過大な電流を流すと、ステーターからの反磁界が発生してローター磁石の磁力が減少します。このことを減磁といいます。当社のモーターは、瞬間最大トルクを発生する電流で減磁しないように設計されています。

2.2.4 ブラシレスモーターの特徴

ブラシレスモーターの特徴を以下に示します。

• DC モーターと比較した場合

- 回転速度－トルク特性は、DC モーターと同じ垂下特性で制御性が良い。
- ブラシと整流子がないため、摩耗粉の清掃やブラシの交換など、定期的なメンテナンスが不要で長寿命
- ブラシと整流子がないため、火花による電気ノイズがない。(スイッチングノイズは発生する。)
- 機械的な摺動音が発生しない。
- 運転するために、ローター磁極位置の検出器や駆動回路が必要
- 検出器の出力からモーターの回転速度を検出してフィードバック制御しているため、速度精度が高い。
- フィードバック制御しているため、運転中の動作異常を検出できる。

• インバータや AC スピードコントロールモーターと比較した場合

- 低速から高速までトルクがフラットなので、実用上の速度比が大きい。
- 同じ出力で比較するとモーターが小型で高効率
- DC 電源で使用できる。
- 検出器の出力からモーターの回転速度を検出してフィードバック制御しているため、速度精度が高い。
- フィードバック制御しているため、運転中の動作異常を検出できる。

DC モーターは価格が安い、要求寿命が比較的短い用途ではあらゆる分野で使われています。しかし、一般産業用途では寿命やメンテナンス性の問題だけでなく、運転時の速度精度や異常検出など高信頼性の要求からブラシレスモーターの使用が多くなっています。また、モーターが小型で高出力、高効率であることから、小型、軽量が求められる装置やバッテリー駆動の用途に使用されています。

2.3 ブラシレスモーターの主な部品

ここでは、ブラシレスモーターを構成する主要な部品について説明します。

2.3.1 磁極検出用の部品

a. ホール素子

ホール素子はホール効果を利用した磁気検出素子で、ローター磁石の磁界を検出して信号を出力します。

N 極の磁界を受けた場合のホール素子の状態を図 2.12 に示します。

素子の上部から下部に電流を流し N 極から矢印の方向に磁界を受けると、素子内の電荷は電磁力によって分布が偏ります。その結果、電流と磁場の両方に直交する方向へ起電力が発生します。

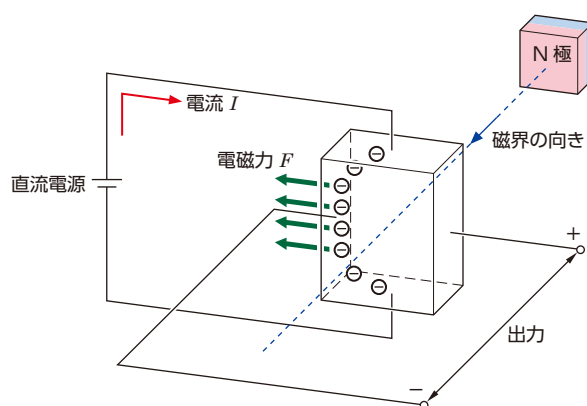


図 2.12 ホール素子検出原理

ホール素子の出力信号は数 100 mV の微弱なアナログ電圧です。モーターのように N 極、S 極が連続的に繰り返される場合、図 2.14 に示すように磁界が安定した部分では一定の出力になり、磁極が切り換わる部分では急激に変化します。

信号が微弱なため、信号線が長い場合や電氣的ノイズの多い環境ではノイズの影響を受けやすくなります。ノイズ対策として、ホール素子の出力信号を整形・増幅して出力する回路を一体化したホール IC があります。



ホール効果の発見

1879 年にアメリカの物理学者 Edwin Herbert Hall が発見しました。

電流が流れている物体に対して垂直方向に磁場をかけると、電流と磁場の両方に垂直な方向へ起電力が発生します。これを利用した半導体がホール素子です。起電力は磁場の強さに対して連続的に変化します。

b. ホール IC

ホール IC は、ホール素子と増幅・整形回路を 1 つのパッケージ (IC) に組み込んだ磁気検出器です。図 2.13 にホール IC の内部構成を、図 2.14 にローター磁石の磁界に対するホール素子の出力信号、ホール IC の出力信号の関係を示します。

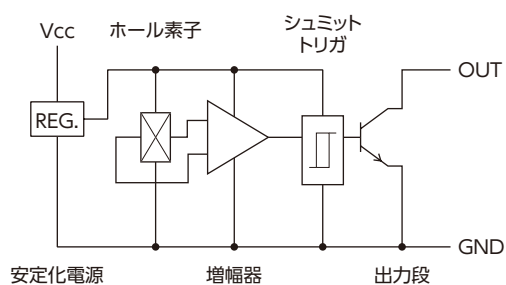


図 2.13 ホール IC のブロック図

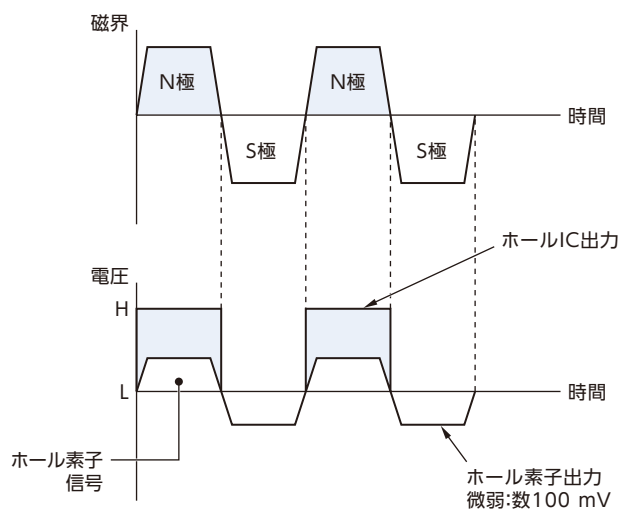


図 2.14 ホール IC の出力信号

ホール素子で磁界を検出した微弱な出力信号を増幅器で増幅し、シュミットトリガで整形して出力します。ローター磁石の磁界の強さがホール IC のしきい値を超えると信号を出力、下回ると信号を停止します。ホール素子の出力電圧に比べてノイズに強く、簡単に使えるようにしたものがホール IC です。

c. エンコーダ

ホール IC はローター磁石の磁極を検出して出力しますが、エンコーダは回転ディスクのスリットを通過した光を受光素子 (フォトダイオード) で電気信号に変換し、増幅・整形して出力します。

エンコーダには図 2.15 に示すように、位置・速度検出 (A 相、B 相) 用の細かいスリットと、磁極検出用のスリットが設けられています。位置・速度検出用の受光素子は、回転ディスクのスリットに対して、信号の位相差が電気角で 90° になるように配置されています。したがって、モーターの回転速度だけでなく、回転量や回転方向を正確に検出できます。

また、磁極検出用の 3 本のスリットと受光素子は電気角で 120° の位相差になるように配置されていますが、エンコーダとローターは別々の部品なので、ローターの磁極位置と磁極検出信号の切り替えのタイミングが合っていない場合があります。このタイミングを合わせるため、エンコーダを組み付けるときに、磁極検出用スリットの位置を調整して組み付ける必要があります。

当社には、磁極信号付きエンコーダを搭載している製品があります。A 相、B 相信号によりモーターの回転速度や回転量を正確に検出できるため、低速での安定した速度制御や位置決め運転が可能です。(詳しくは「5.1.3 速度検出精度」をご覧ください。)

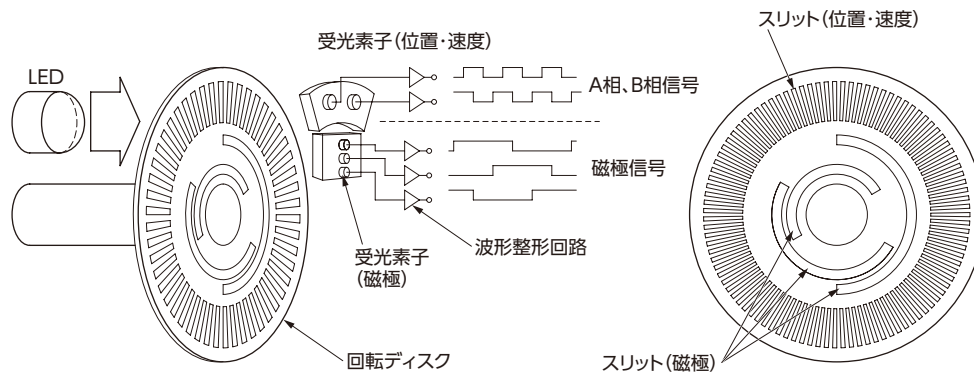


図 2.15 エンコーダの構造

2.3.2 磁界を発生させる部品

誘導電動機は、ローターに誘導された電流とステーターの回転磁界によりトルクを発生しますが、ブラシレスモーターのような同期電動機は、永久磁石の磁界とステーターの回転磁界によりトルクを発生します。ここでは、ブラシレスモーターの特長である小型で高出力、高効率を支える最も重要な部品の永久磁石について説明します。

a. フェライト焼結磁石

1930年に日本人によって発明されました。酸化鉄を主成分としているためコスト的に有利です。また、表面処理も不要なためコストパフォーマンスが良好で、現在でも世界中で最も多く生産、使用されています。

- 最大エネルギー積 (BH) max 8.0~43.8 kJ/m³ [1.0~5.5 MGOe]

b. 希土類焼結磁石

サマリウム・コバルト (SmCo) 系とネオジム (NdFeB) 系があり、ネオジム磁石は最も高性能な磁石で、モーターの小型化、省エネルギー化には欠かせない磁石です。しかし、材料の希土類元素は産出国が限られており、産出量が少ないため高価です。

- 最大エネルギー積 (BH) max 199~414 kJ/m³ [25~52 MGOe]

c. ボンド磁石

フェライトや希土類磁石の微細な磁粉を、樹脂などのバインダと混ぜて成型、製造される磁石です。形状の自由度が高いため、組立、接合の作業性に優れていますが、非磁性部分を含むため磁気特性は焼結磁石の半分以下となります。

- 最大エネルギー積 (BH) max
ネオジム系 63~159 kJ/m³ [8~20 MGOe]
フェライト系 5.6~17.5 kJ/m³ [0.7~2.2 MGOe]



永久磁石発明の歴史

ブラシレスモーターの発展は、永久磁石の発展と密接に関係しています。モーターの小型化・高出力化・高効率化は、高性能磁石の発明によって実現しました。以下に近代永久磁石の登場と進化の年表を示します。

年代	永久磁石と磁気科学の主なできごと
1917 年	本多光太郎博士による「KS 鋼」の発明 (日本)
1919 年	「バルクハウゼン効果」の発見 (ドイツ)
1930 年	ビッター法による「磁区構造と磁区の原理」解明
1930 年	加藤、武井両博士による世界初の「フェライト磁石・OP 磁石」 (日本)
1932 年	三島徳七博士による「MK 鋼」の発明 (日本)
1934 年	本多光太郎博士による「NKS 鋼」の発明 (日本)
1936 年	「白金コバルト (Pt-Co) 磁石」の開発 (ドイツ)
1938 年	「アルニコ磁石」の開発 (アメリカ)
1952 年	「バリウムフェライト磁石」の開発 (オランダ)
1960 年	「マンガン・アルミ (Mn-Al) 磁石」の発明 (オランダ)
1961 年	「ストロンチウムフェライト磁石」の開発 (アメリカ)
1966 年	「サマリウム・コバルト (SmCo5) 粉末磁石」の開発 (アメリカ)
1969 年	「サマリウム・コバルト (SmCo5) 焼結磁石」の開発 (アメリカ)
1970 年	「マンガン・アルミ・カーボン (Mn-Al-C) 磁石」の発明・工業化 (日本)
1971 年	金子博士による「鉄・クロム・コバルト (Fe-Cr-Co) 磁石」の発明 (日本)
1972 年～1974 年	「サマリウム・コバルト (SmCo5) 焼結磁石、ボンド磁石」の工業化 (日本)
1976 年	「サマリウム・コバルト (Sm ₂ Co ₁₇ 系) 焼結磁石」の実用化 (日本)
1983 年	「高速急冷法によるネオジム (Nd-Fe-B) 磁石」の発明 (アメリカ)
1983 年	「ネオジム (Nd-Fe-B) 焼結磁石」の発明 (日本)

※ ネオマグ株式会社 ホームページより

3 ブラシレスモーターの駆動方式

ローターの磁極に対して、適切なタイミングでモーター巻線に電流を流すことでブラシレスモーターは回転します。駆動方式（電流の流し方）とモーターの特性は密接な関係があり、モーターの制御性や特性を改善するためにさまざまな方法が用いられてきました。ここでは、代表的な駆動方式と電流制御の方法について説明します。

3.1 モーターの駆動方式

3.1.1 矩形波駆動方式（120° 通電方式）

ブラシレスモーターの駆動方式にはいくつかの種類がありますが、120° 通電方式の矩形波駆動が一般的です。図 3.1 のように、ホール IC の出力信号の組み合わせで励磁を切り替える方式です。低速運転時に速度むらが発生しますが、簡単な回路で高い出力が得られるため、OA 機器や動力用のブラシレスモーターに広く使用されています。

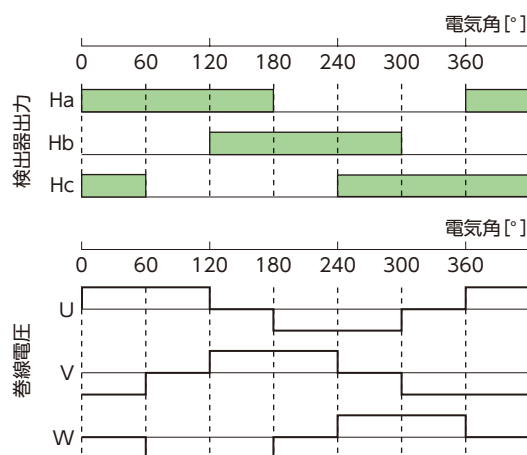


図 3.1 矩形波駆動の励磁パターン

3.1.2 正弦波駆動方式

正弦波駆動は、図 3.2 のように印加電圧を細かく制御することでモーター電流を正弦波状にする駆動方式です。この駆動方式は、トルクリップルが少なく安定した回転が可能になります。また、モーター駆動音の低減にも効果があります。

しかし、正弦波駆動を行うためには、ローターの磁極位置を正確に検出する必要があります。従来は、高分解能のエンコーダが必要でしたが、モーターの全長が長くなる、コストアップになるという問題がありました。

近年は、エンコーダを使用せず、

- ホール IC の信号をソフトウェア的に処理する。
- モーターのインダクタンスや逆起電圧を検出する。

など、別の方法で磁極の位置を推定して正弦波駆動を行うことができるようになりました。

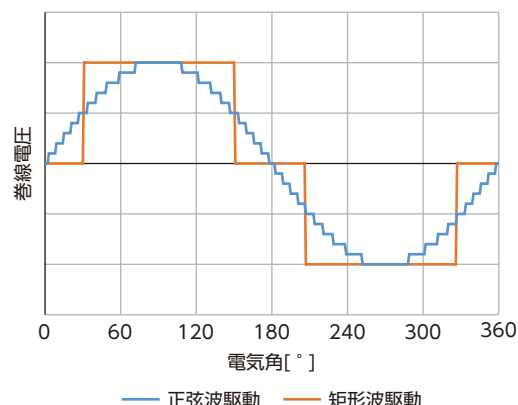


図 3.2 正弦波駆動と矩形波駆動の印加電圧（1 相）

3.1.3 各駆動方式の電流波形

実際の電流波形を図 3.3 に示します。矩形波駆動は印加電圧の波形に対してひずみがあり、矩形波より正弦波に近い波形です。正弦波駆動は印加電圧の波形と類似の電流波形です。

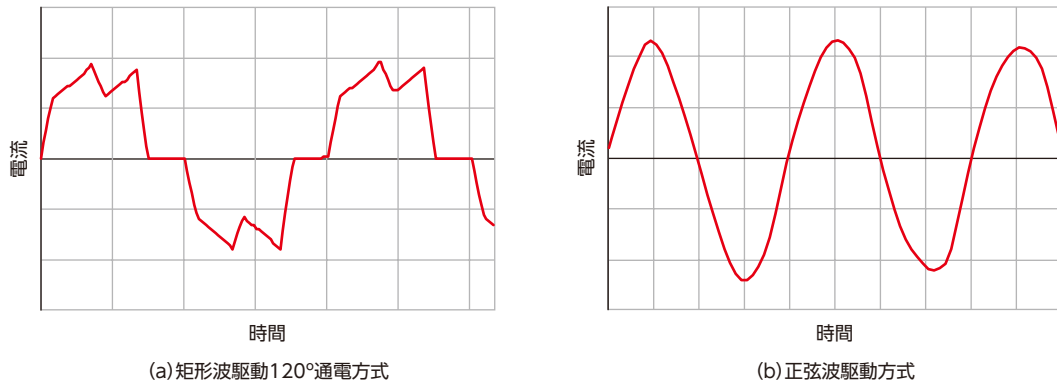


図 3.3 電流波形

3.2 駆動方式とモータートルク

正弦波駆動方式は、矩形波駆動方式に比べてトルクリップルが小さく、滑らかな運転ができます。この理由をモーターのトルク発生原理から考えてみます。モーターとして理想的な駆動方法は、図 2.2 のフレミングの左手の法則に従って磁束と巻線の電流が常に直交するように運転する方法です。この駆動方法は、どのタイプのモーターにも当てはまり、機械的な転流により実現しているのが DC モーターです。ブラシレスモーターのトルク発生原理について、図 3.4 の 3 相 2 極の簡易モデルを使って説明します。

ローターには N 極、S 極の中心に回転軸があり、巻線は回転軸を中心にローター磁石を取り囲むように、U 相、V 相、W 相の 1 巻の巻線が 120° 間隔で配置されています。

U+、V+、W+ は駆動回路に接続されており、Uc、Vc、Wc は 1 点で接続されています（コモン）。ここでは、駆動回路からコモンに流れる向きをプラス、コモンから駆動回路に流れる向きをマイナスとします。

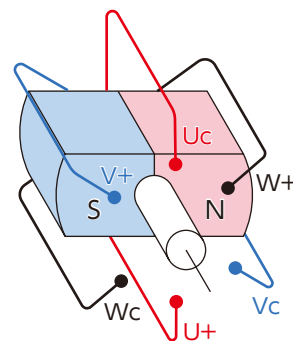


図 3.4 3 相 2 極 簡易モデル

ある相の巻線について詳しく見てみます。図 3.5 の巻線とローター磁石の状態を見ると、DC モーターのローターとステーターを入れ替えた状態になっています。このとき、図 3.5 のように電流を流すと、フレミングの左手の法則に従って S 極側の巻線に下向き、N 極側の巻線に上向きの電磁力が発生します。しかし、ブラシレスモーターでは巻線が固定されているため、ローター磁石に反力が作用して時計方向に回転します。

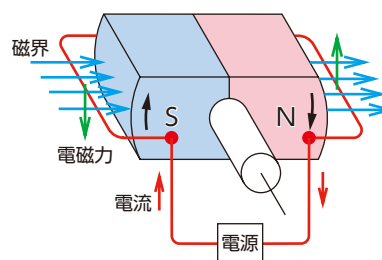


図 3.5 発生トルクが最大の状態

図 3.5 の状態で巻線に作用する電磁力 F [N] は、DC モーターの回転原理で説明した以下の式で求められます。

$$F = i B l \quad (3.1)$$

i : 電流 [A]

B : 磁束密度 [T]

l : 磁界を横切る導体の長さ [m]

しかし、ローターが回転して図 3.6 の状態になると、巻線に作用する電磁力 F はコイルを外側に広げる方向へ発生するため、ローター磁石には回転方向の力（トルク）は発生しません。

すなわち、巻線に対してトルクとして働く磁束密度 B の向きは、回転軸に対して直交しローター磁石の回転角度によって変化します。

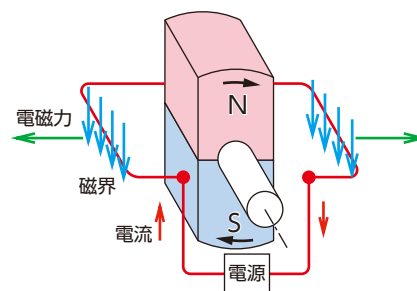


図 3.6 トルクが発生しない状態

ローターが回転したときに、 120° ごとに配置されたU相、V相、W相の巻線に対してトルクとして働く磁束密度（以後、磁束密度）が正弦波状に変化すると仮定します。

図 3.4 のローター角度を 0° 、最大磁束密度を B_0 として時計方向に回転したとき、各相の磁束密度 B_u 、 B_v 、 B_w とローター角度の関係は式 (3.2) で表されます。

$$\left. \begin{aligned} B_u &= B_0 \sin \theta_r \\ B_v &= B_0 \sin \left(\theta_r - \frac{2}{3} \pi \right) \\ B_w &= B_0 \sin \left(\theta_r - \frac{4}{3} \pi \right) \end{aligned} \right\} \quad (3.2)$$

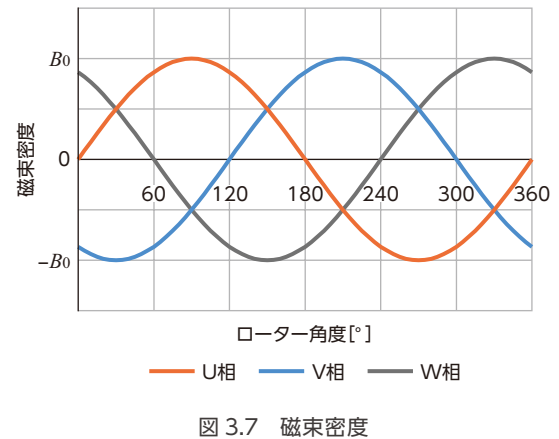


図 3.7 磁束密度

3.2.1 矩形波駆動方式の場合

矩形波駆動時のモータートルクについて、図 3.4 の 3 相 2 極簡易モデルで説明します。

a. 駆動電流

矩形波駆動方式のブラシレスモーターは、「2.2.2 ブラシレスモーターの回転原理」で説明したように、検出器（ホール IC）で検出したローターの角度から励磁パターンに従って、U相、V相、W相の巻線に電流を流します。

図 3.4 のローター角度を 0° 、モーター電流を i_m として時計方向に回転すると、各相の相電流とローター角度の関係は図 3.8 のようになります。

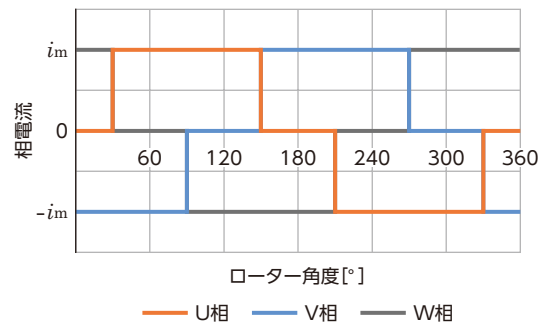


図 3.8 矩形波駆動の電流波形

このときU相の電流は、ローター角度が 30° から 150° 間は i_m の電流、 210° から 330° 間は $-i_m$ の電流が流れます。V相電流、W相電流はU相電流に対して、それぞれ 120° 、 240° 遅れた位相となっています。

b. モーターのトルク

各相の巻線により発生するトルク T は、電磁力 F とローターの回転中心から導体までの距離 r から求められます。

$$T = 2 F r \quad (3.3)$$

$$T = 2 i B l r \quad (3.4)$$

したがって、モーターのトルクは各相の巻線により発生するトルクの和になり、次式で表されます。

$$T = 2 (i_u B_u + i_v B_v + i_w B_w) l r \quad (3.5)$$

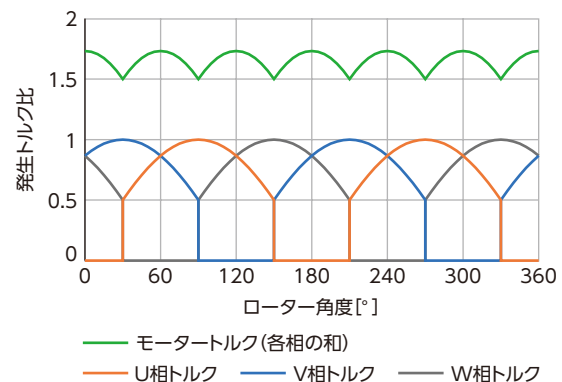


図 3.9 矩形波駆動のトルク波形

r 、 l 、 i_m と B_0 を1として、式(3.2)、図3.8、式(3.5)から、ローター角度ごとに各相の磁束密度と電流からトルクを計算すると、図3.9のトルク波形になります。1回転中に6個のトルクリップルが発生しているため、低速回転時に速度むらが発生します。

3.2.2 正弦波駆動方式の場合

正弦波駆動時のモータートルクについて、図3.4の3相2極簡易モデルで説明します。

a. 駆動電流

ローターを時計方向に回転したとき、 120° ごとに配置されたU相、V相、W相の巻線に対して、図3.10のように 120° 位相差の正弦波状の電流を流します。図3.4のローター角度を 0° 、電流の最大値を i_m として時計方向に回転すると、各相の電流 i_u 、 i_v 、 i_w は、それぞれ式(3.6)で表されます。

$$\left. \begin{aligned} i_u &= i_m \sin \theta_r \\ i_v &= i_m \sin \left(\theta_r - \frac{2}{3} \pi \right) \\ i_w &= i_m \sin \left(\theta_r - \frac{4}{3} \pi \right) \end{aligned} \right\} \quad (3.6)$$

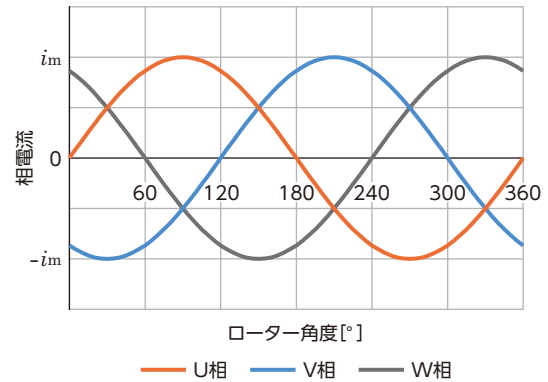


図 3.10 正弦波駆動の電流波形

b. モーターのトルク

矩形波駆動と同様に、モーターのトルクは各相の巻線によって発生するトルクの和になり、式(3.5)で求められます。

また、式(3.2)と式(3.6)から、式(3.5)は以下のように簡略化できます。

$$T = 3 r i_m B_0 l \quad (3.7)$$

式(3.7)の r 、 l 、 i_m と B_0 を1として、ローター角度ごとに各相の磁束密度と電流の積の和を計算すると、図3.11のトルク波形になります。式(3.7)ではローター角度 θ の項がなくなり、図3.11のモータートルクが一定です。すなわち、正弦波駆動では1回転中のトルクリップルがなく、低速回転時に滑らかな運転ができます。

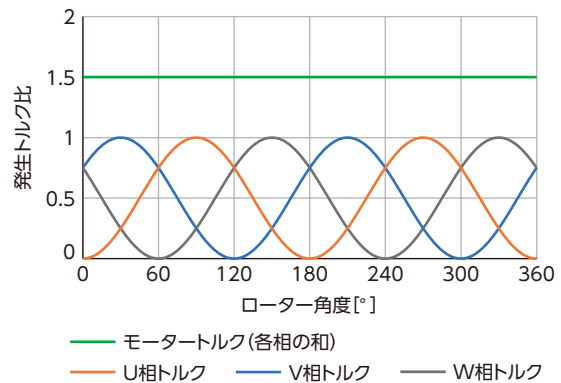


図 3.11 正弦波駆動のトルク波形

3.3 電流の制御方法

ブラシレスモーターは駆動方式によって電流の流し方が異なります。また、回転速度や発生トルクを制御するためにはモーター電流の大きさを制御する必要があります。ここでは、モーター電流の制御方法について説明します。

モーター巻線に印加する電圧の制御方法として、PWM (Pulse Width Modulation) という電力制御方式を使っています。PWM 制御は、回路上のスイッチング素子を繰り返し ON、OFF することでパルス状の電圧をつくり、出力電圧を制御する方法です。

図 3.12 は DC モーターの PWM 制御回路モデルです。ON 時間幅が変化 (変調) したときの電圧波形と電流波形を図 3.13 に示します。パルス幅を変調し、スイッチング素子の ON、OFF 時間のデューティを変えることで平均電圧を制御します。

このとき、インダクタンスの影響で電流は電圧に遅れて増加し、電圧の印加がなくなると徐々に減少するように変化します。

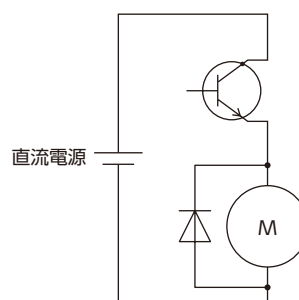


図 3.12 PWM 回路

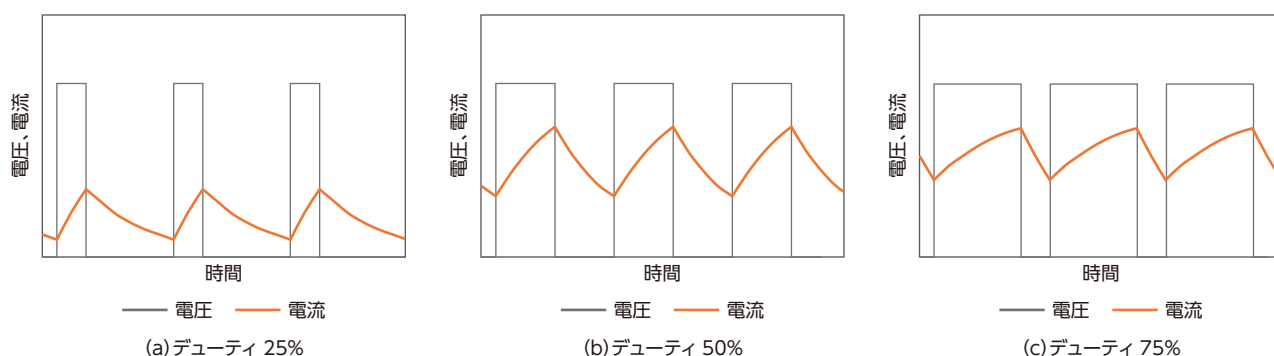


図 3.13 電圧デューティと電流波形

3.3.1 変調方法

図 3.13 で説明した、PWM 制御の変調方法について説明します。PWM 制御のデューティ比は、基準となる三角波信号と基準電圧を比較し、三角波信号の電圧が基準電圧よりも低い場合にスイッチング素子を ON、高い場合に OFF することで決まります。モーター電流を増やす場合は、基準電圧を高くします。すると、スイッチング素子のデューティ比が大きくなり、平均電圧が高くなるためモーター電流が増加します。基準電圧を低くするとデューティ比が小さくなり、平均電圧が低くなるためモーター電流が減少します。

矩形波駆動方式のブラシレスモーターは、モーター巻線を励磁するスイッチング素子に対して、PWM 制御を行うことでモーター電流を調整し、回転速度や発生トルクを制御しています。

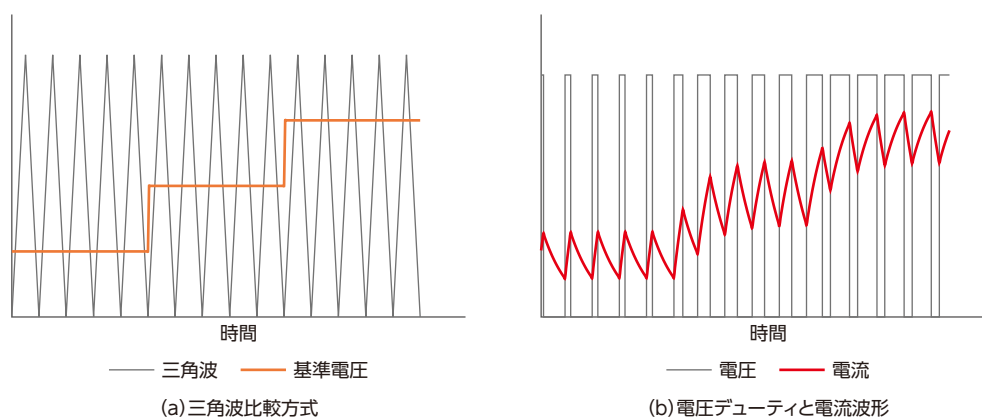


図 3.14 基準電圧と電流

3.3.2 正弦波駆動方式の変調方法

図 3.10 で説明した、正弦波駆動方式の変調方法について説明します。基準電圧を正弦波状にすると、スイッチング素子のデューティ比が連続的に変調して正弦波状の電流を流すことができます。すなわち、PWM 制御では基準電圧の波形と電流波形は同じような形になります。（出力したい波形の基準電圧を変調信号といいます。）正弦波駆動方式のブラシレスモーターは、矩形波駆動方式と同様に PWM 制御を行いますが、基準電圧の作り方が異なります。

式 (3.6) から正弦波のモーター電流は、電流の最大値 i_m とローター角度 θ の関数となっています。すなわち、ローター角度の情報と電流の指令値から変調信号をつくることで、モーター巻線に流す電流を調整し回転速度や発生トルクを制御しています。

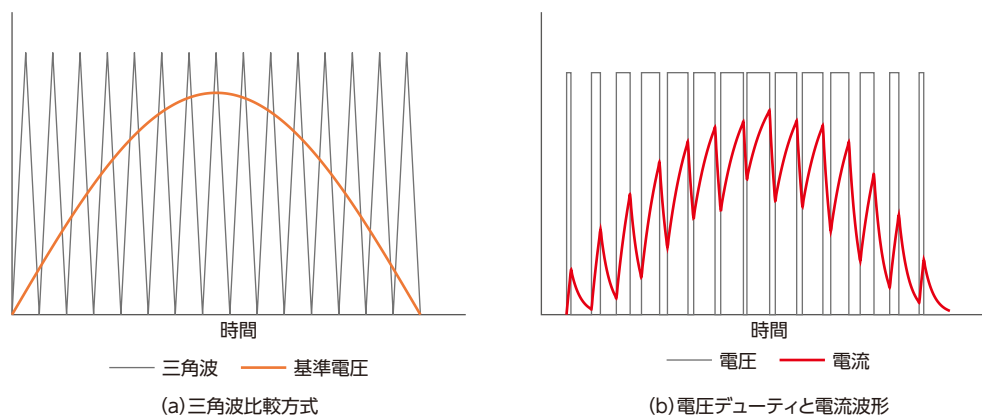


図 3.15 正弦波 PWM 駆動

以上のように、ブラシレスモーターで正弦波駆動を行うためには、ローター磁石の角度を細かく検出する必要があります。

4 ブラシレスモーターの制御原理

ブラシレスモーターは駆動回路と組み合わせることで回転できます。モーターを指令どおりの回転速度で運転するためには、速度を制御するためのシステムが必要です。ここでは、ブラシレスモーターの駆動回路の構成と速度制御の方法について説明します。

4.1 基本的な駆動回路の構成と役割

基本的なブラシレスモーターの駆動回路の構成を、図 4.1 の破線内に示します。機能別に見ると 6 つのブロックから構成されています。

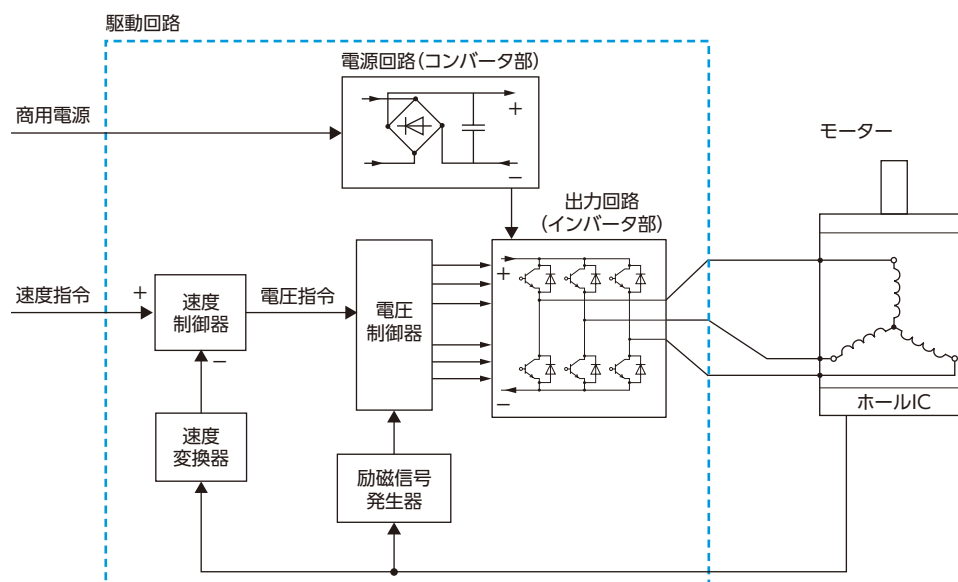


図 4.1 基本的な駆動回路の構成

4.1.1 電源回路（コンバータ部）

電源回路は、商用交流電源の交流電圧をダイオードブリッジで整流し、コンデンサで平滑して直流電圧に変換します。直流電圧は出力回路に供給され、モーターの駆動に使われます。

DC 電源入力のブラシレスモーターには、電源回路はありません。直流電源から直接、直流電圧が出力回路に供給されます。

4.1.2 速度制御器

速度制御器は、速度指令と速度変換器から出力したモーター速度（フィードバック速度）を比較して、モーターの回転速度が速度指令に追従するように電圧指令を出力します。

速度指令とフィードバック速度の情報をを使った制御系を、速度ループといいます。

4.1.3 速度変換器

速度変換器はホール IC 出力の周波数をフィードバック速度に変換し、速度制御器に出力します。

3 相のブラシレスモーターにはホール IC が 3 個あり、ローター磁極の N 極、S 極一对に対して 3 個のパルス信号を出力します。パルス信号のアップエッジとダウンエッジを検出することで、6 個の信号が得られます。

4.1.4 励磁信号発生器

励磁信号発生器は、出力回路の 6 個のスイッチング素子の中から電流を流す素子を電圧制御器に指示します。

図 4.1 に示したように、モーター内部に配置されたホール IC (Ha、Hb、Hc) の出力信号の組み合わせから、ローター磁極角を検出します。回転方向の指令に対してトルクを発生する巻線に接続されたスイッチング素子を電圧制御器に指示します。

4.1.5 電圧制御器

電圧制御器は、励磁信号発生器で指示された出力回路のスイッチング素子に対して、速度制御器から指令された電圧を印加するように信号を出力します。

4.1.6 出力回路 (インバータ部)

出力回路は、電圧制御器からの指令に従ってモーター巻線に PWM 制御を行います。



回転速度の求め方

ローターの極数を n 極、パルス信号の間隔を Δt とすると、モーターの回転速度 N は式(4.1) で求められます。

$$N = \frac{60}{3n \Delta t} \quad (4.1)$$

N : モーターの回転速度 [r/min]

Δt : パルス信号の間隔 [s]

4.2 速度制御方法

ブラシレスモーターの速度制御を行う方法について、モーターが停止した状態から指令された速度に達するまでの流れを例に説明します。

1. 速度制御器に速度指令を入力する。
2. 速度制御器で速度指令とモーターのフィードバック速度を比較する。
3. フィードバック速度が速度指令よりも小さいので、速度制御器から電圧制御器に高い電圧指令を出力する。
4. 電圧制御器からの信号で出力回路を制御してモーターに指令された電圧を印加する。
5. モーターが回転を始め加速する。
6. モーターのフィードバック速度が速度指令に近づく、速度制御器からの電圧指令が小さくなる。
7. モータートルクが小さくなり、加速が緩やかになる。
8. さらにフィードバック速度と速度指令の差が小さくなり、速度制御器からの電圧指令が小さくなる。
9. モータートルクが負荷トルクよりも小さくなり、モーターが減速する。
10. フィードバック速度と速度指令の差が大きくなり、速度制御器からの電圧指令が大きくなる。
11. モーターが加速する。

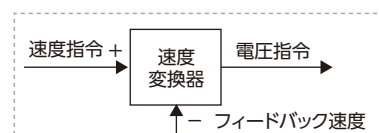


図 4.2 速度制御器

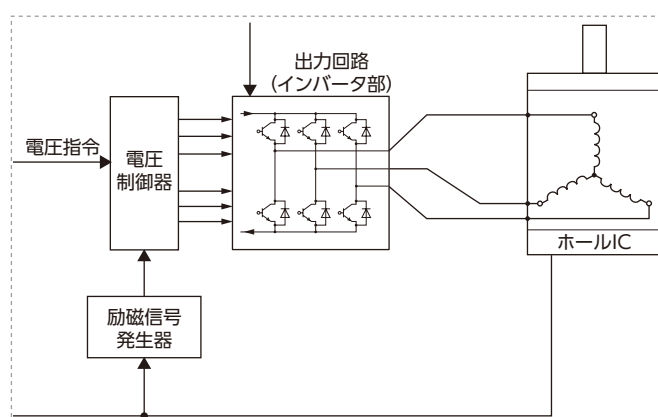


図 4.3 電圧制御器

以上のように、モーターの回転速度が速度指令に追従するように加速、減速を繰り返すことで速度を制御します。

4.3 高精度な駆動回路の構成と役割

モーターの応答性を高める、正弦波駆動により発生トルクを滑らかにするなど、高精度な制御を行う駆動回路について説明します。図 4.1 に示した基本的な駆動回路に加えて、モーター電流を細かく制御できるように電流ループを設けています。また、正弦波駆動を行うために、励磁信号発生器をローター角演算器に変更しています。ここでは、基本的な駆動回路に対して追加、変更されたブロックについて説明します。

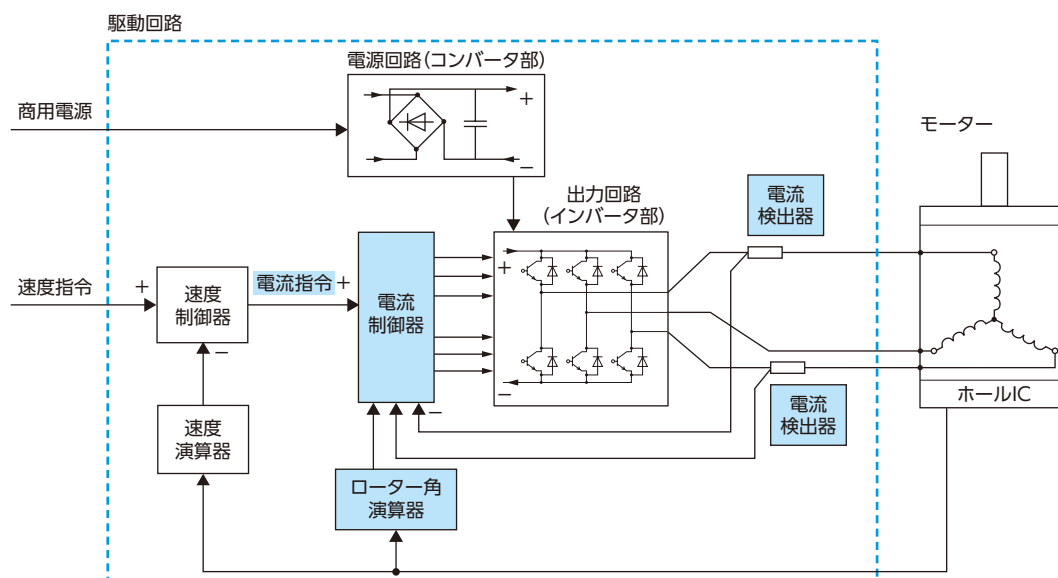


図 4.4 高精度な駆動回路の構成

4.3.1 電流検出器

電流検出器はモーター巻線に流れている電流を検出して、電流制御器にフィードバックします。モーターに入力される電流の和とモーターから出ていく電流の和は等しいため、3相モーターの場合は2相分の電流を検出することで3相分の電流を推定できます。

ブラシレスモーターの発生トルクは、モーターの電流に比例するという特性があるため、モーター電流を検出することでモーターが発生しているトルクを推定できます。

4.3.2 ローター角演算器

ローター角演算器は、ホール IC からの信号をもとに独自開発のアルゴリズムを使ってローターの位置を連続的に計算します。ローター位置が連続的に推定できることで正弦波駆動が可能となり、トルクリップルが小さく滑らかな運転ができます。

4.3.3 電流制御器

電流制御器は、正弦波駆動を行うための励磁信号制御を行います。また、速度制御器からの電流指令と電流検出器からのモーター電流を比較演算してモーターへの電流を制御します。制御回路に電流ループが加わることで、瞬時にモーター電流を調整して、電流指令との偏差がなくなるように制御できます。

4.4 トルクの制御方法

ブラシレスモーターのトルクは、モーター電流に比例する関係があります。「2.2.3 ブラシレスモーターの特性」で説明したように、モーター電流の最大値を制限することで発生トルクが一定になるところが現れます。

高精度な駆動回路において電流指令の上限値を I_1 、 I_2 、 I_3 と設定すると、モーター電流が設定値と等しくなるようにフィードバック制御を行い、モーターの最大トルクは図 4.5 の T_1 、 T_2 、 T_3 となります。

すなわち、駆動回路でモーター電流の上限値を制限することで、モーターの発生トルクを制限できます。この機能をトルク制限機能といい、設定したトルク値で物を押しつけたり、ギヤヘッドや機器の破損を防ぐことができます。

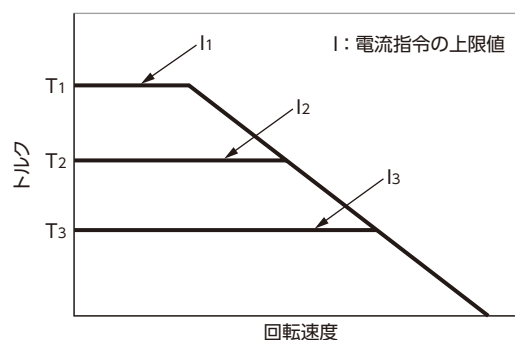


図 4.5 回転速度-トルク特性（電流制限時）

4.5 制動（回生運転）

モーターを減速、停止する方法として、単純にモーターへの電力を遮断する方法がありますが、自然停止となるため停止時間は長くなります。停止時間を短くするための制動方法を説明します。

ブラシレスモーターはローターに永久磁石を使用しています。速度指令よりモーター速度が遅い場合はモーターとして働き（力行運転）駆動トルクを発生しますが、速度指令よりもモーター速度が速い場合は発電機として働き制動トルクを発生します。

モーターによって発電される電力を回生電力と呼び、回生電力が発生するような運転状態を回生運転といいます。回生運転時のモーターの制動トルクは、電流値に比例し、回生電力は制動トルクとモーター回転速度の積で決まります。

起動、停止時のモーター速度を、図 4.6 に示します。モーター運転時に発生する回生運転の代表的な例として、

- 負荷を上下駆動する場合の下降運転時（巻き下げ運転時）
- 慣性負荷の起動後のオーバーシュート時（図 4.6 ①）
- 慣性負荷の減速停止運転時（図 4.6 ②）

などがあります。

特に、図 4.6 ①のオーバーシュート時や②の減速開始時は、回転速度が高いため、大きな回生エネルギーが発生します。

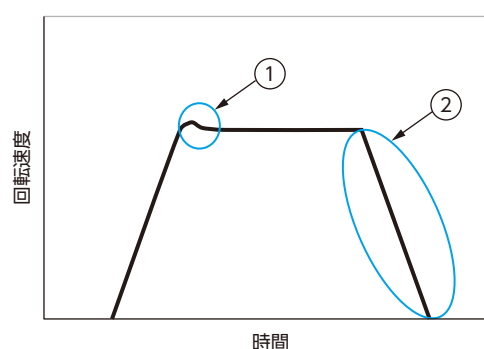


図 4.6 運転時の回生電力発生箇所

制動時の電流を、赤色の矢印で図 4.7、図 4.8 に示します。制動時は力行運転時とは逆向きのトルクが発生するように電流を流します。この電流の向きは、発電（逆起電圧）によって流れる電流の向きと同じです。

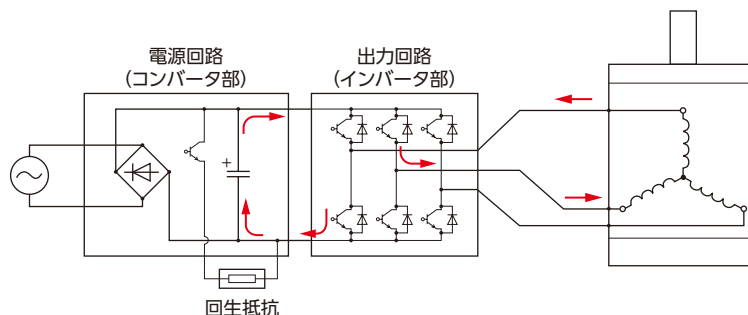


図 4.7 トランジスタ ON 時

制動トルクを制御するために、インバータのトランジスタを ON/OFF します。トランジスタが OFF の状態になるとドライバからの印加電圧はなくなりますが、逆起電圧とモーター巻線（コイル）に誘起電圧が発生します。これらの電圧により流れる電流は、図 4.8 のようにダイオードを通してドライバの電源回路（コンバータ）部に戻ってきますが、ダイオードブリッジがあるため電源に戻ることができず、平滑用コンデンサに蓄えられます。

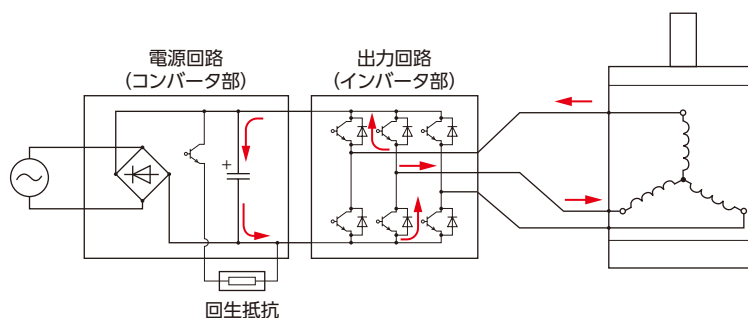


図 4.8 トランジスタ OFF 時

コンデンサに蓄えられるエネルギー E は、次式で求められます。

$$E = \frac{1}{2} C V^2 \quad (4.2)$$

E : エネルギー [J]

C : コンバータ部平滑用コンデンサの容量 [F]

V : コンデンサ端子間電圧 [V]

駆動回路の電源部にあるコンデンサの容量 C は固定値です。回生運転が行われた場合には、回生エネルギーの一部がコンデンサに蓄えられます。そのため、コンデンサ端子間には、蓄えられたエネルギーに応じた電圧が発生します。

制動時の慣性負荷が大きい場合や上下駆動での負荷が大きい場合は、平滑コンデンサの端子間電圧が上昇し、駆動回路の回路部品の破損につながります。駆動回路の破損を防ぐためには、回生エネルギーを抵抗で熱エネルギーに変換する、または電源回生装置を使用して商用電源に戻す方法があります。数 100 W 程度の小型モーターの場合は、回生抵抗を用いる方法が一般的です。平滑コンデンサの端子間電圧が設定電圧を超えたときに、回生抵抗に電流を流して回生エネルギーを熱エネルギーに変換することで消費します。

5 ブラシレスモーターに用いられている技術

ブラシレスモーターは、速度制御用モーターとしての特性に優れたモーターです。本章では、この性能を実現するために用いられている技術について解説します。

5.1 広い速度制御範囲（低速運転）

ブラシレスモーターを、低速で滑らかな運転をするために用いられている技術について説明します。

5.1.1 低コギング設計

無通電状態のモーターシャフトを指で回したときに感じる脈動的なトルクを、コギングトルクといいます。ブラシレスモーターはローターに永久磁石を使用しており、ローターと対向するステーターの突出部(ティース)間のエアギャップに蓄えられる磁気エネルギーが、ローターの回転位置によって変化します。ローターとティースの向かい合う角度によって、磁気エネルギーのバランスがとれたり崩れたりを繰り返すことでコギングトルクが発生します。特に、高エネルギー積の磁石を使用している場合は、磁気エネルギーが大きくなるためコギングトルクが大きくなる傾向があります。

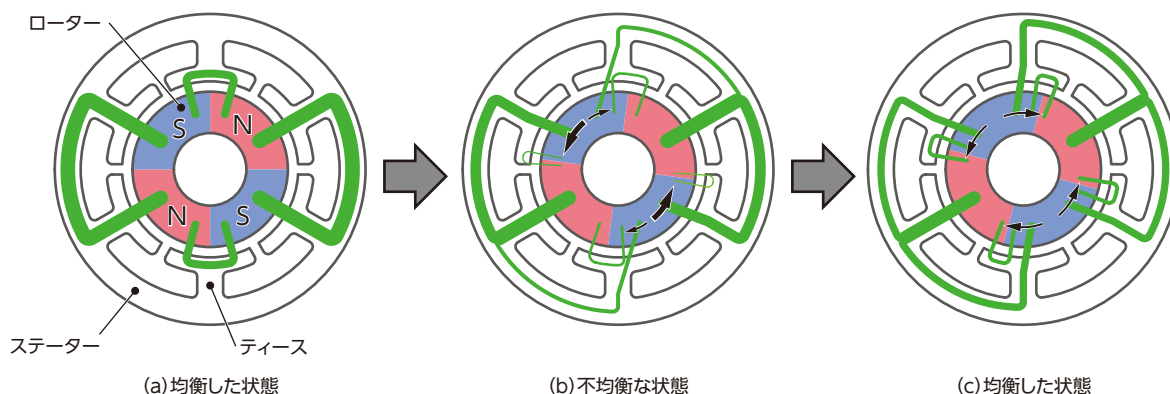


図 5.1 磁気エネルギーの状態

図 5.1 に示した 4 極 6 スロットのモーターを例に、ローターの角度と磁気エネルギーの状態を説明します。ローター磁石で発生した磁束は、緑色の線で示した経路でステーター鉄芯を通り N 極から S 極に流れます。緑線の太さは磁束の量を、中心方向に対する線の曲がりは磁気エネルギーのアンバランス状態を示しています。このときローターには、磁束がまっすぐになるようとする方向（黒矢印の向き）に力が発生します。

図 5.1(a) の状態ではすべての磁束が中心に向かっており、各スロットに対する磁気エネルギーのバランスは釣り合っています。ローターを 7.5° 時計方向に回した図 5.1(b) の状態では、S 極と対向した各ティース間で磁気エネルギーのバランスが崩れて、黒色の矢印の向きと太さに応じたトルクが発生します。トルクの向きは逆向きですが、発生トルクが大きい反時計方向にトルクが発生しています。さらに、ローターを 7.5° 時計方向に回した図 5.1(c) の状態では、S 極と対向した各ティース間で磁気エネルギーのバランスが崩れて、黒色の矢印の方向にトルクが発生します。この状態で発生したトルクは、反対方向に同じ大きさのため打ち消され、コギングトルクが発生しません。

コギングトルクは、モーターを運転しているときにも発生しています。モーター運転中に負荷トルクの変化として働き、スムーズな運転を阻害するので、磁気設計の段階で低く抑える必要があります。コギングトルクの低減方法は、これまでいろいろ研究されてきました。主に以下のような方法があります。

- ティースの数と磁石極数の適正な組み合わせ
- ローター磁石の配置、または磁石の着磁を斜めにする。(ロータースキュー)
- ステーターを軸方向に対してねじるように積層する。(ステータースキュー)
- 磁石形状とステーター形状の最適化
- 磁石着磁波形の最適化

ティースの数と磁石極数の適正な組み合わせは、コギングトルク対策として最も有効な方法です。一般的に、モーター1回転あたりのコギングトルクの周期は、磁極数とティース数の最小公倍数となります。また、最小公倍数が大きいほどコギングトルクは小さくなります。

8極12スロットのモーターと10極12スロットのモーターのコギングトルクの比較を、図5.2に示します。モーター1回転あたりのコギングトルクは、8極12スロットモーターでは24周期、10極12スロットモーターでは60周期になっています。10極12スロットモーターは発生する周期が細かく、コギングトルクも小さくなっていることがわかります。当社のブラシレスモーターは、10極12スロットモーターを採用しています。

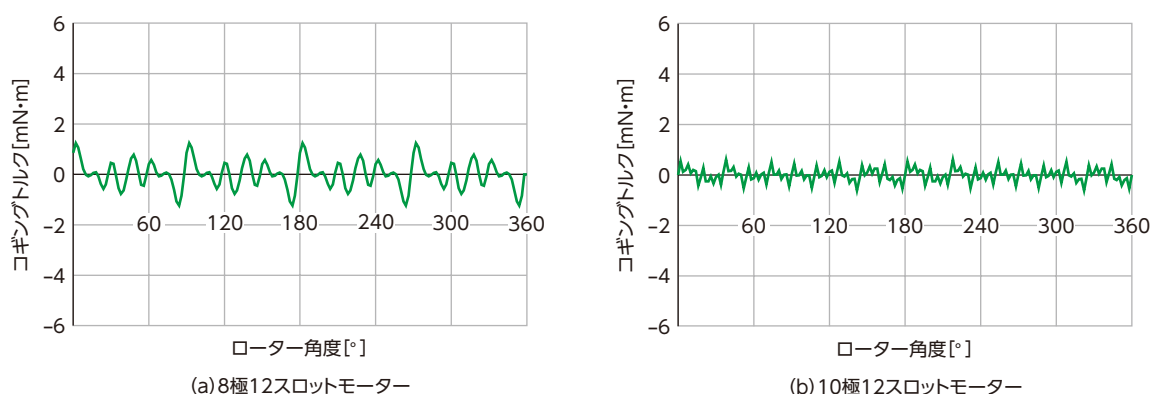


図 5.2 コギングトルク

5.1.2 正弦波駆動

正弦波駆動を行うことでモーター1回転中のトルクリップルが小さくなり、低速でも滑らかな運転ができます。原理については「3.2.2 正弦波駆動方式の場合」で解説しましたが、その中でポイントとなる前提条件について説明します。

a. 巻線に作用する磁束密度

巻線に作用する磁束密度は、式(3.2)のように正弦波状に変化するのが理想です。正弦波に対してひずみがあるとモーターのトルクにリップルが生じ、速度むらの要因となります。理想的な磁束密度の波形を作る方法は、コギングトルクの低減方法と同じで、以下の方法があります。

- ティースの数と磁石極数の最適な組み合わせ
- ローターまたはステーターにスキューを施す
- 磁石形状とステーター形状の最適化
- 磁石着磁波形の最適化

ただし、コギングトルクが小さくなる形状と、最適な磁束分布が得られる形状は同じにはならないため、バランスを考慮した磁気回路設計を行っています。

b. モーター電流が正弦波

モーターに流す電流は、式(3.6)のように正弦波が理想です。磁束密度と同様にひずみがあるとトルクリップルが発生し、速度むらの要因となります。理想的な電流波形を作るためには、ローターの磁極位置を細かく正確に検出する必要があります。当社では、断続的なホール IC の信号をソフトウェアで処理することにより、高分解能なローターの磁極位置情報を得ています。

5.1.3 速度検出精度

ブラシレスモーターは、ホール IC からの信号を速度演算器で回転速度に変換してモーター速度の情報を得ています。モーターを低速で運転すると、ホール IC の検出信号が図 5.4 のように粗くなり、モーター速度の検出値が周期的に変化します。フィードバック速度の検出値が脈動すると、速度制御器の電圧（電流）指令が脈動するため、モーター速度が脈動します。

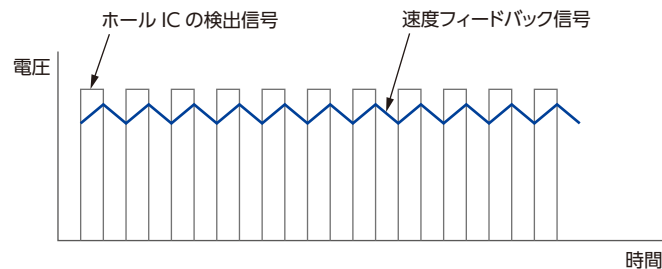


図 5.3 モーター速度が速い場合

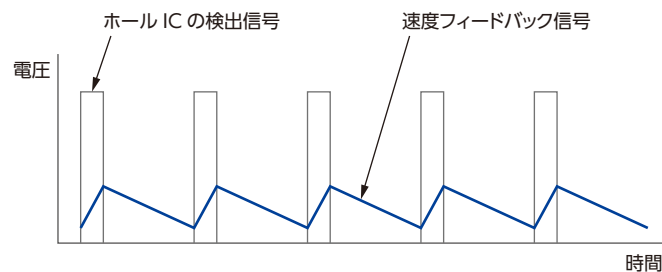


図 5.4 モーター速度が遅い場合

当社ブラシレスモーターは、ローターの磁極数を 4 極から 10 極に増やしたことでホール IC の信号周波数が 2.5 倍になり、低速でのフィードバック信号の脈動によるモーター速度の脈動が改善されています。

速度検出に磁極検出用のセンサを使っているブラシレスモーターは、低速での運転に向いていませんでした。しかし、磁気解析技術の向上、ソフトウェアによる信号処理技術や駆動技術の向上により、4 極のモーターでは 300 r/min であった最低速度を 80 r/min まで下げることができました。また、低速でも出力トルクが一定なので、低速から高速まで幅広く制御できます。

5.2 広い速度制御範囲（高速運転）

ホール IC の信号波形、モーター電流の波形を、図 5.5 に示します。

500 r/min 時に比べて 1000 r/min 時では、ホール IC の信号に対して、電流波形の遅れとモーター電流の増加が見られます。

ブラシレスモーターを駆動する場合は、ホール IC の信号と励磁パターンに従って巻線に電圧を印加します。しかし、回転速度が速くなると、モーターのインダクタンスにより電流の位相に遅れが生じます。電流の位相に遅れが発生したことで、モーターの発生トルクに対して無効な電磁力が発生し、有効な電磁力が小さくなります。モーターは回転速度を維持するように制御しているため、電流を増やして必要なトルクを発生します。さらに、速度が上がると位相の遅れが大きくなり、回転できなくなります。

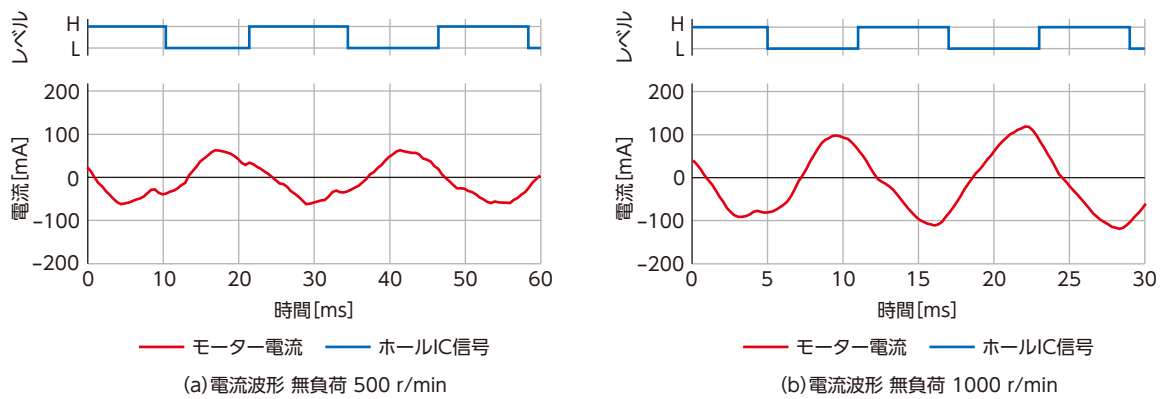


図 5.5 電流位相遅れ

高速運転を実現するために必要な、電流の位相遅れを補正する方法を説明していきます。

5.2.1 位相制御による出力トルク補正

進み角制御とは、モーター速度に応じて電流の位相遅れ分を算出し電圧位相を進めることで、出力トルクを補正できます。電圧位相を進める値を進み角 α と呼び、以下の式で求めることができます。

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{\omega L}{R}\right) - \sin^{-1}\left(\frac{(K_e \omega)(L \omega)}{E_m \sqrt{(L \omega)^2 + R^2}}\right) \quad (5.1)$$

α : 進み角 [rad]

ω : モーター電流の角速度 [rad/s]

R : 巻線抵抗 [Ω]

L : 巻線インダクタンス [H]

K_e : 逆起電圧定数 [V·s/rad]

E_m : ドライバ発生電圧の大きさ [V]

しかしながら、このような複雑な計算を行う場合は処理能力が高い CPU が必要になります。そのため、この式をそのまま計算するのではなく、進み角の近似式を用いて計算します。

進み角と回転速度の関係を図 5.6 に示します。進み角の大きい領域では、回転速度に対してほぼ直線的に変化するため、直線近似式を使って進み角と回転速度の関係を表現できます。同様に、進み角と印加電圧の関係も直線近似できるので、進み角は回転速度と印加電圧から求めることができます。しかし、直線近似だけでは低速高負荷運転時の位相の進みすぎによる、効率やトルクの低下が起こるため、実際には進み角の値に制限を設けています。

この制御方式のメリットは、電流ループが不要なため回路構成が簡単で、モーター制御系の調整要素が少なく済むことです。

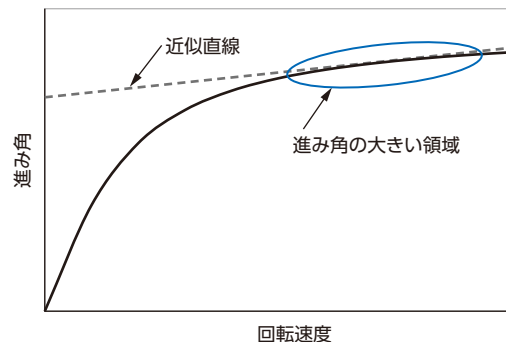


図 5.6 回転速度と最適進み角の関係

5.2.2 ベクトル制御

ベクトル制御は、三相モーターの巻線に流れる電流から数学的テクニックを用いて、DC モーターと等価なモデルに変換して制御を簡素化する制御方法です。

ブラシレスモーターのU相、V相、W相に流れる電流は、モータートルクやローターの回転角によって刻々と変化します。この状態で電流制御の計算処理を行うことは困難です。そこで、3相を2相に変換し、さらに固定座標を回転座標に変換することで、ローターの回転角に関係なくトルクを発生する電流成分(q軸電流)と、磁束を発生する電流成分(d軸電流)に分解できます。

この状態で、トルクを発生するq軸電流と磁束を発生するd軸電流の検出値を、指令値に追従させるように電流ループを構成することで、出力トルクと巻線を貫く磁束(鎖交磁束)を任意に制御できます。

出力トルクと鎖交磁束が別々に制御できるため、高応答で出力トルクの制御や速度制御を行うことができます。また、鎖交磁束を制御することで、省エネルギー運転を目的とした最大効率制御が可能です。最大トルク制御、弱め界磁制御など、回転速度-トルク特性を改善することも可能です。

ベクトル制御による電流波形の改善例を図 5.7 に示します。図 5.7 (a) はベクトル制御を行わなかった場合、図 5.7 (b) はベクトル制御を行った場合です。駆動回路では、ホール IC 出力信号のアップエッジでモーター電流がマイナスからプラスへ切り換わるように制御しています。ベクトル制御を行わなかった場合では、モーター電流に遅れが見られます。図 5.7 (b) では、ホール IC 信号のアップエッジと電流の切り換わりが一致し、電流位相の遅れが解消しています。また、ベクトル制御を行ったことでモーター電流値が小さくなっています。

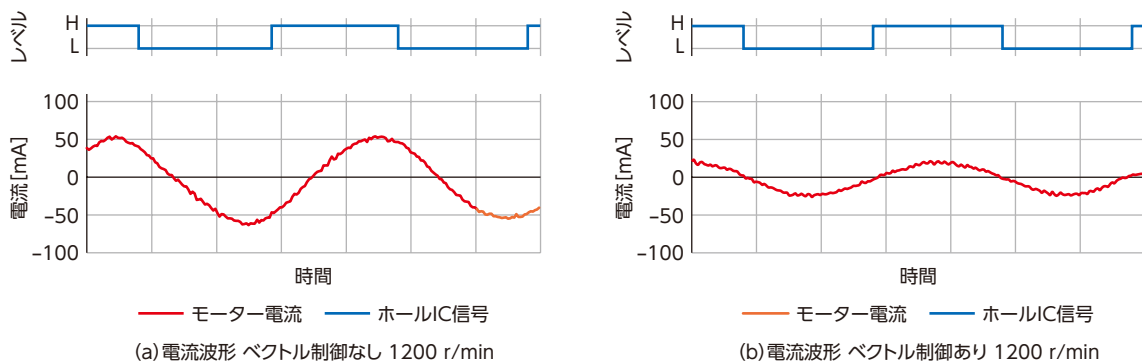


図 5.7 ベクトル制御時の電流波形

図 5.7 のベクトル制御あり、なしの状態を、回転座標上の電流ベクトルで表すと、図 5.8 のようになります。(反時計方向に回転時)

ベクトル制御を行わない場合は、磁束の位相に対して 90° よりも小さい向き(赤い破線のベクトル)となっています。モーター電流にはトルクとして働く有効電流 (q 軸電流) 成分以外に、トルクとして働かない無効電流の成分が含まれています。

ベクトル制御を行う場合は、磁束に対して 90° の向きに電流を流します。ベクトル制御によって、磁束と電流の向きを常に 90° に保つことで、高速運転時の電流位相の遅れや無効電流がなくなり、効率の良い運転が実現できます。

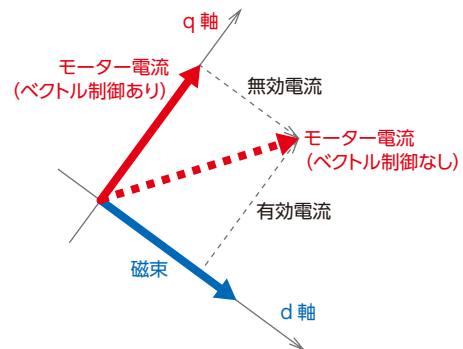


図 5.8 電流位相



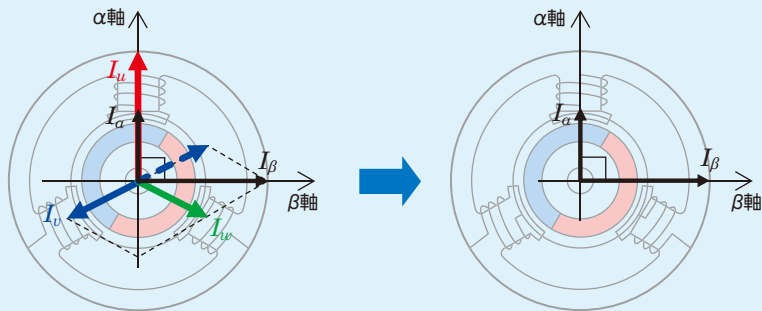
ベクトル制御の原理

1. モーター電流値 I_u 、 I_v 、 I_w を検出
2. 3 相の電流値を直交する 2 軸の 2 相電流値に変換 [クラーク (Clarke) 変換]

$$I_\alpha = I_u - \frac{1}{2} I_v - \frac{1}{2} I_w$$

$$I_\beta = -\frac{\sqrt{3}}{2} I_v + \frac{\sqrt{3}}{2} I_w$$

I_α 、 I_β の値は、ローターの角度ごとに変化します。

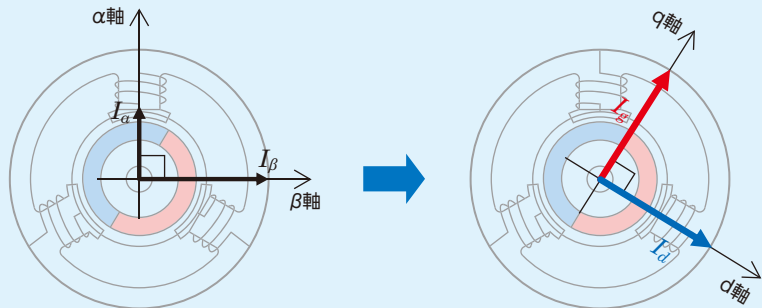


3. 2 相の電流値を、固定座標からローターに同期して回転する回転座標上に座標変換 [パーク (Park) 変換] します。d 軸の向きを磁界の向きに固定するように座標変換することで、導体が回転している DC モーターと同じ直流電流として扱えるので、計算が非常に簡単になります。

$$I_d = I_\alpha \cos\theta + I_\beta \sin\theta$$

$$I_q = -I_\alpha \sin\theta + I_\beta \cos\theta$$

I_d 、 I_q の値は、ローターの角度 θ に関係なく一定の値になります。



4. 実際の I_d (d 軸電流)、 I_q (q 軸電流) と、指令値の差を比較します。
5. 電流ループで電流指令値と I_d 、 I_q (q 軸電流) が一致するように印加電圧を制御します。

5.2.3 弱め界磁制御

弱め界磁制御は d 軸電流により磁束を発生する部分 (界磁) の磁束を弱めることで、高速回転時のモーター発生トルクを引き上げる制御です。

ブラシレスモーターの基本特性は、図 5.9 のような垂下特性です。モーターの発生トルクはモーター電流と比例関係があるので、高速になるほど電流値が小さくなっています。その理由を以下に説明します。

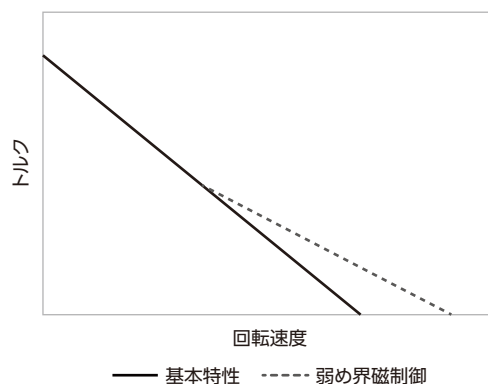


図 5.9 回転速度ートルク特性

ブラシレスモーターが回転しているときの各部の電圧は、以下の式で表されます。

$$V = R i + L \frac{di}{dt} + K_e \frac{d\theta}{dt} \quad (5.2)$$

V : 電源電圧 [V]

R : 巻線抵抗 [Ω]

i : モーター電流 [A]

L : 巻線インダクタンス [H]

di/dt : 電流の時間変化率

K_e : 逆起電圧定数 [V·s/rad]

$d\theta/dt$: ローターの角速度 [rad/s]

式 (5.2) の左辺は印加電圧、右辺第 1 項は巻線抵抗にかかる電圧、第 2 項はインダクタンス成分による電圧、第 3 項は逆起電圧を示しています。

式 (5.2) より

$$i = \left(V - L \frac{di}{dt} - K_e \frac{d\theta}{dt} \right) / R \quad (5.3)$$

式 (5.3) より、モーターの回転速度が高くなるとインダクタンス成分による電圧降下や逆起電圧が高くなり、モーターの電流は小さくなります。このため、ブラシレスモーターの回転速度ートルク特性は、図 5.9 のような垂下特性となります。

高速回転時に弱め界磁制御を行い、d 軸の負方向に電流を流して界磁の磁束を弱めることで、巻線に発生する逆起電圧を下げるすることができます。逆起電圧が下がることでモーターの電流が大きくなるため、発生トルクが大きくなります。これにより、高速運転時の使用速度範囲を広げることができます。(図 5.9)

5.3 高精度な速度制御

5.3.1 速度変動率

速度制御用モーターの重要な仕様のひとつに、速度変動率があります。速度変動率とは、モーターを設定速度で運転中に、負荷トルクや電源電圧、周囲温度など使用環境が変化したときの速度変動の割合です。当社は、定格回転速度から以下の条件を変化させたときの速度変動の割合を仕様としています。したがって、定格回転速度が 3000 r/min で速度変動率 $\pm 0.2\%$ の場合は、 ± 6 r/min ということになります。速度の変動幅はセンサの検出精度に依存するため、運転速度が 3000 r/min 以外の場合でも速度変動の幅は ± 6 r/min 程度です。

- 対負荷: 無負荷状態を基準として定格負荷を加えた場合
- 対電圧: 定格電圧を基準として許容電圧内で電圧が変化した場合
- 対温度: 周囲温度が 25 °C を基準として使用周囲温度内で温度が変化した場合

ブラシレスモーターは、ホール IC の信号から算出したフィードバック速度をもとにクローズドループでモーター速度を制御しています。ローターの多極化により、ホール IC の信号量が増えたことで回転速度の検出精度が高まり、速度変動率が小さく、ほぼ指令速度どおりに運転できます。

速度検出器を持たず、センサレスで速度を制御しているインバータは、負荷トルクの変化によってモーターの回転速度が変わってしまいます。

表 5.1 対負荷速度変動率

種類	シリーズ	対負荷変動率
ブラシレスモーター	BX IIシリーズ	$\pm 0.05\%$
	BLE2 シリーズ	$\pm 0.2\%$ ※
	BMU シリーズ	$\pm 0.2\%$
AC スピードコントロールモーター	DSC シリーズ	$\pm 1\%$ (参考値)
インバータ	組み合わせモーター KII Sシリーズ	-0.8% (ベクトル制御 参考値)

※ デジタル設定時

速度変動率が小さいため、ワークの数量や重量が定まらない搬送コンベアや、粘性が変化する液体の攪拌装置や吐出ポンプなどで、安定した運転ができます。また、塗装や加熱など、搬送しながら加工時間を一定にしたい用途に適しています。

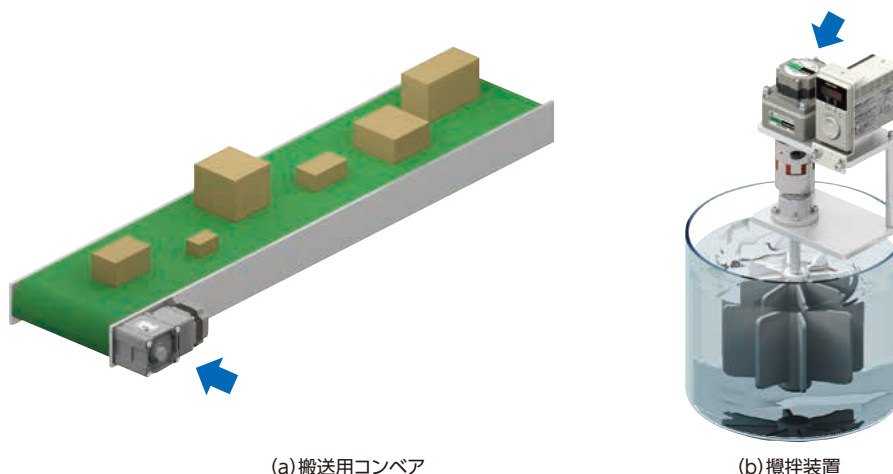


図 5.10 用途例



速度変動率とフラッタ特性の違い

モーターの速度安定性を示す特性として、速度変動率の他に、フラッタ特性があります。

- ・速度変動率 : 使用環境が変化したときに発生する平均速度の変動の割合
- ・フラッタ特性 : 一定の速度で回転しているときに発生する平均速度に対する速度むらの割合

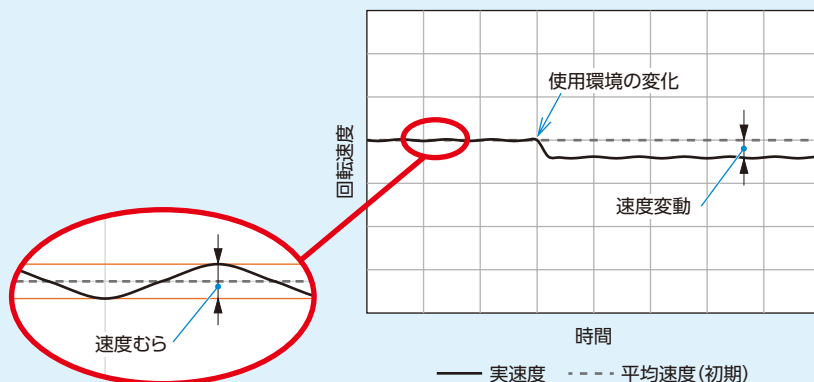


図 5.11 モーター速度波形

モーターの平均速度そのものが変化するのが速度変動、平均速度は一定で実際の速度が変化している幅が速度むらです。

速度むらは、モーター1回転中のトルクむらや、速度制御を行っていることにより発生します。画像検査装置では画面の揺れ、塗装装置では塗装面の塗りむらとして現れます。

5.3.2 高信頼性

ブラシレスモーターは、ホールICからのフィードバック速度をもとにクローズドループでモーター速度を制御しているため、速度変動率が小さく安定した運転ができることは説明しました。常にモーター速度を検出しているので、なんらかの要因で過負荷が加わり、速度が低下した場合やモーターが停止した場合にアラーム信号を出力するため、異常の検出が可能です。

また、過負荷インフォメーション、過負荷ワーニング機能を使用することで、過負荷アラームが働く前に負荷の増加を検知できます。これにより、突然のライン停止を防いで計画的に保全作業を行うことができます。

5.4 安定した停止位置

高精度な位置決め運転を行う場合、一般的に、停止精度の優れたステッピングモーターやサーボモーターを使用します。しかし、使用条件や使い方によっては、低コストの速度制御用モーターやACモーターを使った簡易的な位置決め運転でも、停止精度の要求値を満足できる場合があります。

搬送物や回転物を目標の位置で停止させたい場合は、瞬時停止機能を持ったスピードコントローラ、ドライバを使用します。ただし、搬送物を検出するために、停止位置にセンサを設置し、プログラマブルコントローラなどによる制御が必要です。

停止信号が入ると、モーターは、ローター慣性モーメントや負荷慣性モーメントの影響によりオーバーランして停止します。その際、装置の摩擦トルクが大きいほど、オーバーラン量は少なくなります。

5.4.1 オーバーラン量

ACスピードコントロールモーター**DSC**シリーズ 25 W と、ブラシレスモーター**BLE2**シリーズ 30 W の制動特性を、図 5.12 に示します。

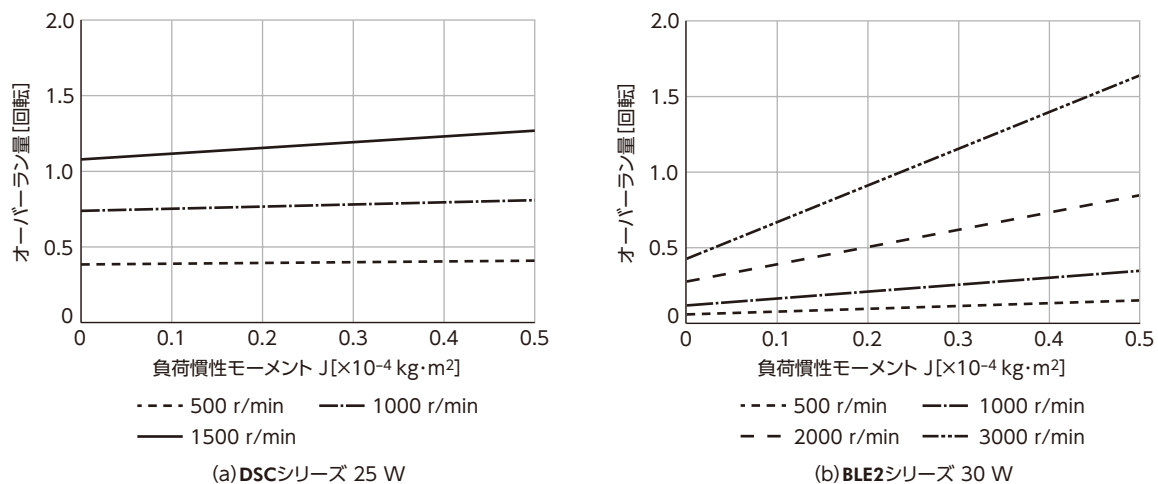


図 5.12 制動特性

この制動特性は、摩擦負荷がない場合の負荷慣性モーメントとオーバーラン量(平均値)の関係を示しています。モーターの回転速度が高く、負荷慣性モーメントが大きいほど回転エネルギーが大きいため、停止までのオーバーラン量が多くなります。

5.4.2 オーバーラン量のばらつき

AC スピードコントロールモーター、ブラシレスモーターともに、オーバーラン量にはばらつきがあります。図 5.13 に負荷慣性モーメント $J = 0.251 \times 10^{-4} \text{ kgm}^2$ 、回転速度 1000 r/min の運転条件で運転／制動を 100 回繰り返したときのオーバーラン量のばらつきを示します。

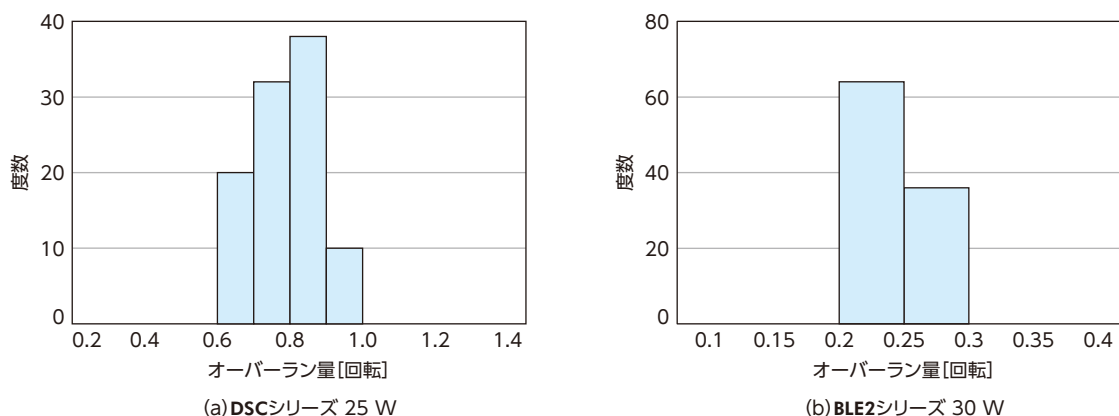


図 5.13 オーバーラン量のばらつき

AC スピードコントロールモーターやブラシレスモーターの多くは、ギヤヘッドとの組み合わせで使われます。たとえば、減速比 10 のギヤヘッドを組み合わせる場合は、ギヤシャフトでのオーバーラン量の平均値とばらつきは表 5.2 のようになります。この値に、ギヤヘッド内部の歯車のガタ (バックラッシ) 1~2° を考慮する必要があります。

表 5.2 オーバーラン量と停止位置のばらつき

対象製品	オーバーラン量の平均値	オーバーラン量のばらつき
DSC シリーズ 25 W	0.078 回転 (28.08°)	± 0.015 回転 (± 5.40°)
BLE2 シリーズ 30 W	0.024 回転 (8.64°)	± 0.003 回転 (± 1.08°)

オーバーラン量と停止位置のばらつきの差は、AC スピードコントロールモーターとブラシレスモーターの制動方法の違いにより発生します。

5.4.3 AC スピードコントロールモーターの制動方法

AC スピードコントロールモーターは、トライアックを使った位相制御により、モーターへの印加電圧を制御しています。制動信号が入力されるとトライアックを OFF し、サイリスタを一定時間 ON します。図 5.14 に示した赤色の矢印のように、ダイオードを通してモーターの主巻線 (L)・補助巻線 (S) に半波整流された同相の電流が流れます。これによって直流制動 (発電制動) が働き、モーターを瞬時に停止させます。

電源電圧の位相と制動信号を入力するタイミングにより、制動電流が流れ始める時間 (制動開始時間) は電源周波数に対して最大 1 サイクルの遅れが発生します。このため、オーバーラン量にはばらつきが発生します。

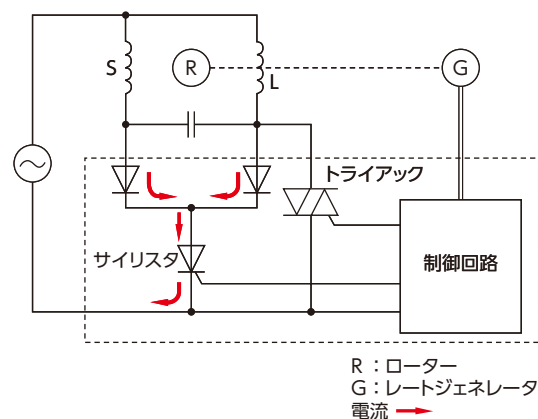


図 5.14 直流発電制動

運転信号、制動電流、モーター速度の関係を図 5.15 に示します。

左右の図を比べると、運転信号を OFF (制動信号が ON) してから、制動開始時間やモーターが停止するまでの時間に電源周波数 1 サイクルの差が見られます。

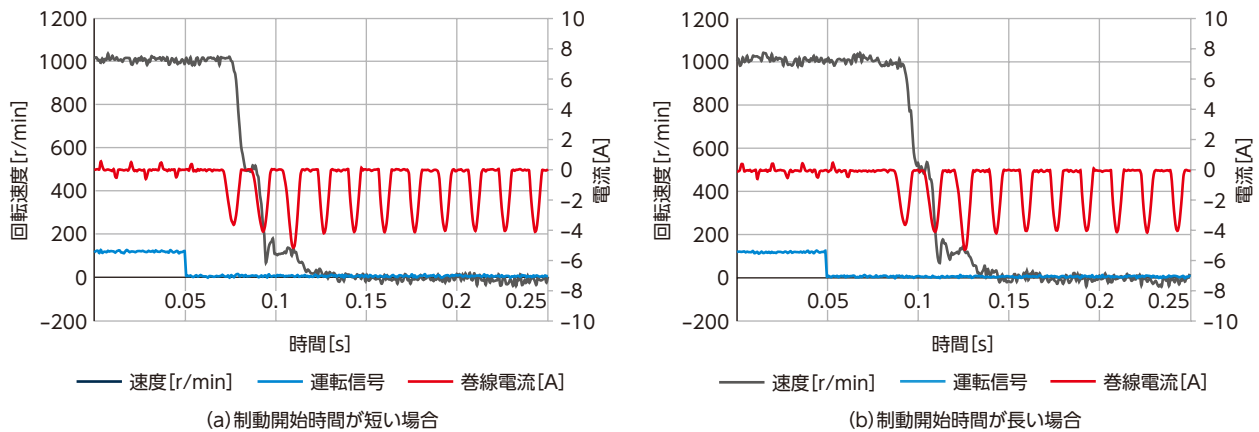


図 5.15 制動波形 AC スピードコントロールモーター

5.4.4 ブラシレスモーターの制動方法

「4.5 制動 (回生運転)」で説明したように、ブラシレスモーターは制動時にモーターを発電機として働かせ、回転エネルギーを電気エネルギーに変換することで制動トルクを発生します。図 5.17 を見ると、運転信号を OFF (制動信号が ON) した直後から巻線に回生電流が流れています。電源電圧の位相と制動信号を入力するタイミングに影響されることなく制動トルクを発生できるため、停止位置が安定します。

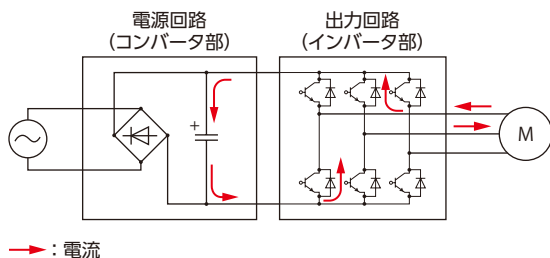


図 5.16 回生制動

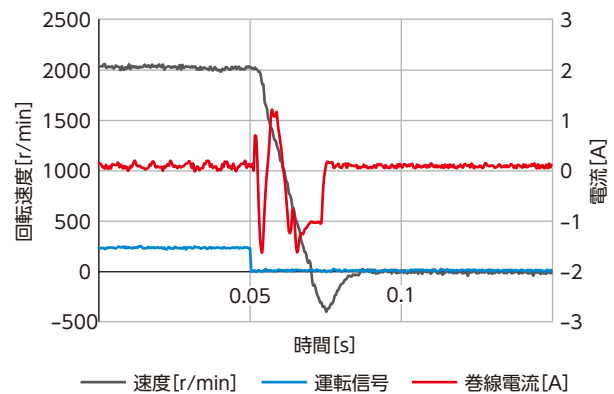


図 5.17 制動波形 ブラシレスモーター

5.5 高効率・省エネルギー

IEA (International Energy Agency) から公表された World Energy Outlook 2016 によると、世界の総電力消費の半分以上がモーター関連であると報告されています。エネルギー消費削減は世界的な課題であり、モーターの高効率化については、120 W 以上の誘導電動機を対象とした国際規格 IEC 60034-30-1 で効率クラスが規定されています。現在は IE4 効率クラスまで規定されていますが、IE5 効率クラスについても予定されています。

永久磁石内蔵のブラシレスモーターは、IEC 60034-30-1 の対象外ですが、三相誘導電動機と比べると高効率で、モーターと駆動回路を合わせた効率は、IE5 の効率クラス (予定値) を上回っています。ここでは、ブラシレスモーターの損失低減技術について、主に当社製品の **BMU** シリーズを例に説明します。

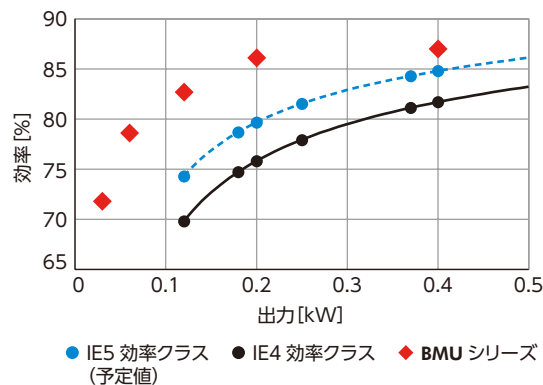


図 5.18 BMU シリーズ
モーターとドライバの総合効率

5.5.1 モーター損失

損失の分類を図 5.19 に示します。モーターの損失は、銅損、鉄損、漂遊負荷損、機械損に分かれます。一般的にモーターの損失は、銅損と鉄損が損失の多くを占めています。また、モーターが小型になるほど銅損の割合が大きくなるため、損失の低減はモーターの大きさに合わせて効果的な対策をとることが重要です。

次に、主な損失と、損失改善技術について説明します。

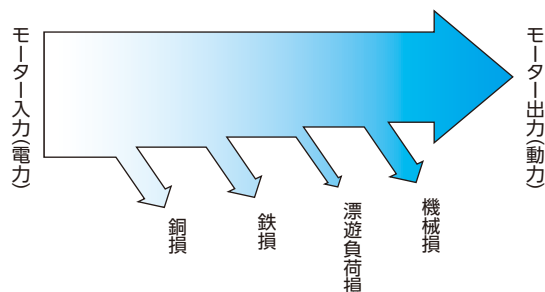


図 5.19 モーターの損失

5.5.2 銅損

銅損は、銅線に電流を流すことで発生するジュール損失であり、下記に示す式により求められます。

$$P_c = i^2 R \quad (5.4)$$

$$R = \rho_c \frac{l}{S} \quad (5.5)$$

P_c : 銅損 [W] ρ_c : 導体の抵抗率 [$\Omega \cdot m$]
 R : 巻線抵抗 [Ω] l : 導体巻線の長さ [m]
 i : 巻線電流 [A] S : 導体の断面積 [m^2]

式 (5.4) より、銅損は、電流値や巻線の抵抗値が低いほど小さくなります。また、式 (5.5) より、巻線の抵抗値は導体の断面積が大きいほど小さくなり、銅損を小さくすることができます。そのため、なるべく隙間なく太い銅線を巻くことがポイントです。スロット断面積 (ステーターの銅線を巻く部分の面積) に対して

銅線が占める面積の割合のことを占積率といい、この値が高いほど隙間なく銅線が巻かれていることを示します。

a. 電流値の低減

誘導電動機は、ステーターがつくる回転磁界により、ローター内部のかご型導体に誘導電流が流れてトルクが発生します。このため、巻線電流には、トルクを発生するための電流と誘導電流をつくるための電流が含まれます。また、巻線電流と誘導電流により、ステーター巻線とかご型導体に銅損が発生します。

ブラシレスモーターは、ローターに永久磁石を使用しているため誘導電流が不要です。トルクを発生する電流だけでよいから、誘導電動機に比べて巻線電流を減らすことができます。ローターでの銅損がなく、ステーター巻線の銅損を少なくできるため、誘導電動機に比べて銅損が少なくなります。

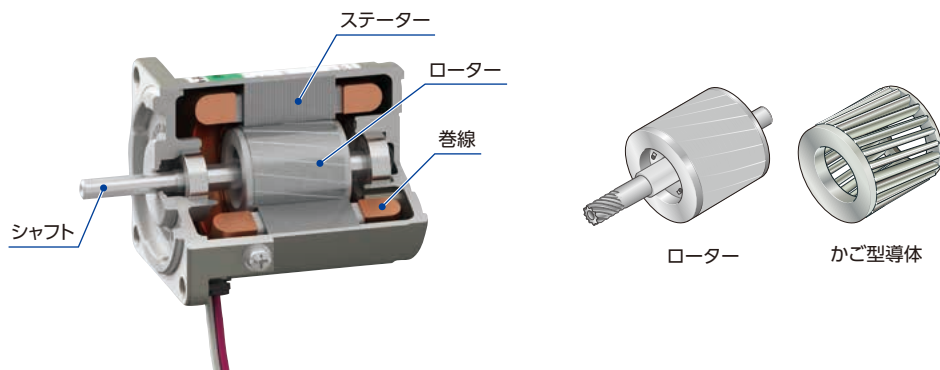


図 5.20 誘導電動機の構造

b. 巻線抵抗値の低減

BMU シリーズをはじめとする近年のブラシレスモーターでは、従来品のネオジムボンド磁石に比べ、エネルギー積が約 6 倍のネオジム焼結磁石を採用しています。ローター磁石からの磁束密度が増えたため、出力が同じ従来品に比べて巻線の巻数を減らすことができました。

しかし、磁束密度が増えたため、図 5.21 のようにティース幅を広げる必要があります。そこで、モーターケースを使用しないフレームレス構造にしてステーター鉄芯（コア）の外径を大きくし、スロット面積を増やしました。それに加え、巻線の整列性を上げる技術を開発しました。これらによって、より太い導体を使用することが可能となり、巻線抵抗や銅損を下げることができました。

また、磁束密度が増えたことで巻線の巻数を減らすだけでなく、ステーターコアの長さ（積厚）を短くすることもできます。

BMU シリーズは、マグネットの高性能化やステーター形状、巻線技術の改善による占積率向上をもとに、従来品に比べてステーターコアの積厚を半分にし、銅損を 11% 低減しました。

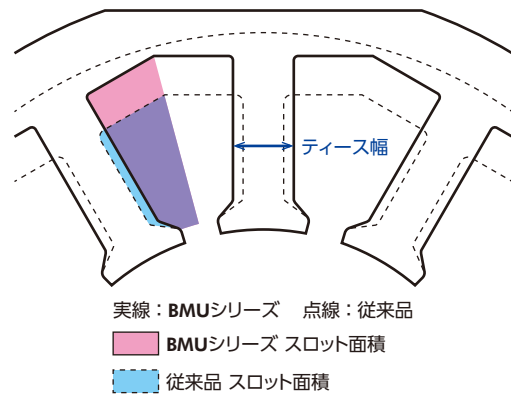


図 5.21 スロット面積

5.5.3 鉄損

鉄損は、ステーターコアやローターコア内を通る磁束密度の時間変化によってコア内に生じる渦電流による損失と、交番磁化による磁化エネルギーのヒステリシス損に分けられ、下記の式で表されます。

$$P_i = P_h + P_e \quad (5.6)$$

$$P_h = k_h f B^{1.6} m \quad (5.7)$$

$$P_e = k_e t^2 f^2 B^2 m / \rho \quad (5.8)$$

P_i : 鉄損 [W]	f : 界磁周波数 [Hz]
P_h : ヒステリシス損 [W]	B : 最大磁束密度 [T]
P_e : 渦電流損 [W]	m : コア質量 [kg]
k_h : 比例定数	t : 電磁鋼板の厚さ [m]
k_e : 比例定数	ρ : 電磁鋼板の抵抗率 [$\Omega \cdot m$]

式 (5.7)、式 (5.8) より、モーターの鉄損に関係する要素は、電磁鋼板の材質で決まる比例定数、電磁鋼板の厚さ、抵抗率とモーター設計で決まる界磁周波数、最大磁束密度、コア質量に分けて考えることができます。

モーターの鉄損を低減するためには、薄くて鉄損が低い、飽和磁束密度が高い、周波数特性の良い電磁鋼板が理想ですが、これらの特性にはトレードオフの関係があります。また、加工性やコストを考慮する必要があります。設計に関する要素についても、使用するマグネットや、銅損と鉄損のバランスを最適化する必要があります。

a. ヒステリシス損の低減

式 (5.7) より、ヒステリシス損は最大磁束密度の 1.6 乗 (1.5～2 乗とも言われています) に比例します。しかし、最大磁束密度が低いと最大トルクも低下するため、特性を維持しつつ鉄損を減らすには、より保磁力が低く磁化エネルギーの小さい電磁鋼板を選ぶ必要があります。

b. 渦電流損の低減

高速回転するモーターや多極のモーターは、電磁鋼板への励磁周波数が高くなります。式 (5.8) より、渦電流損は最大磁束密度、界磁周波数、電磁鋼板の板厚の 2 乗に比例するため、高周波鉄損の低減には薄い電磁鋼板を使うことが効果的です。低損失のモーターでは 0.35 mm、0.25 mm などの電磁鋼板が採用されており、さらに薄い素材の開発も進んでいます。

また、非磁性で抵抗値の高いケイ素 (Si) を添加すると、電磁鋼板の固有抵抗値が増加して渦電流が流れにくくなります。しかし、同時に、非磁性成分の添加により最大磁束密度も下がるため、最大トルクが減少します。電磁鋼板製造業者では、ケイ素 (Si) 量の調整や結晶組織の制御などで相反する 2 つの性質を高めた製品の開発が進められています。

BMU シリーズでは、高性能磁石の採用によってステーターの積厚が従来品の半分になり、高特性電磁鋼板の採用と合わせて鉄損を 50%低減しています。これらの技術の採用により、**BMU** シリーズは従来品に比べ、全長は 12%短縮しつつ出力は 33%向上、効率は 7%向上しました。

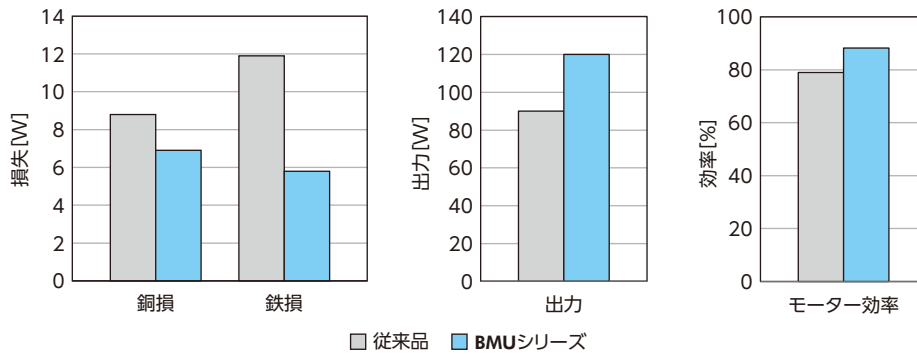


図 5.22 **BMU** シリーズの損失改善

5.5.4 漂遊負荷損

モーター損失全体から、銅損、鉄損、機械損を差し引いた残りの損失が漂遊負荷損です。従来は原因不明な損失として扱われていました。しかし、近年は解析技術の向上により、漂遊負荷損が漏れ磁束などによる局所的な損失として可視化できるようになってきています。

5.5.5 機械損

モーターの機械損は、軸受やオイルシールなどの機械的な接触部分による摩擦損失と、誘導電動機に使われているような軸直結の冷却ファンで発生する風損です。ブラシレスモーターは損失が小さく、軸直結の冷却ファンが不要なので、機械損を抑えることができます。

5.6 モーターが小型で軽量

ブラシレスモーターは、同じ定格出力の三相モーターよりも小型で軽量です。モーターの定格出力とは、仕様で定められた周囲温度や電源電圧などの条件下で連続運転を行ったときに、使用している部品(主にステーター巻線)の温度上昇が許容温度を満足できる出力です。

ブラシレスモーターは、「5.5 高効率・省エネルギー」で説明した高効率、省エネルギー技術により、モーター損失が小さくなっています。モーターの温度上昇は、損失と放熱量のバランスなので、損失が小さいほどモーターを小型化できます。

同じ出力のブラシレスモーターと三相モーターの、形状、損失比較を図 5.23 に示します。モーターが小型、軽量になることで、装置の小型化や軽量化につながります。特に、バッテリー駆動の走行車では、小型で軽量であることが運転できる時間に直結するため重要視されます。

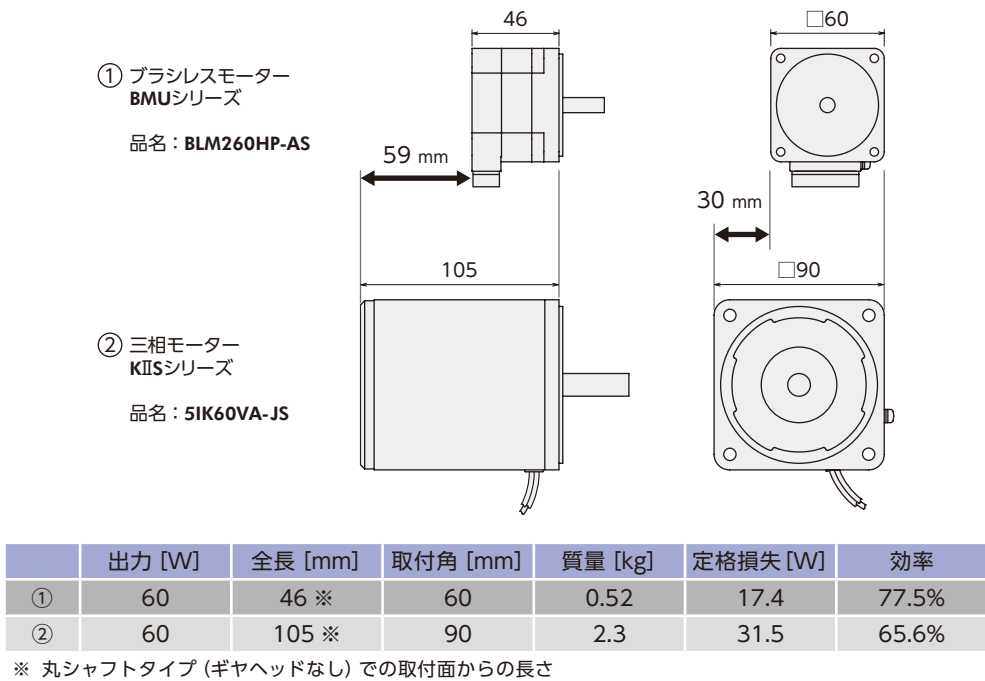


図 5.23 形状、損失比較

あとがき

「テクニカルマニュアル ブラシレスモーター編」をお読みいただきありがとうございます。

本書では、ブラシレスモーターについて構造や動作原理を理解していただくことで、AC スピードコントロールモーターやインバータとの違いを理解していただくことに主眼を置いて説明しました。幅広い速度範囲や速度精度など、他のモーターとは異なる諸特性について理解いただけたことと思います。

実際にブラシレスモーターをお使いいただくうえでは、モーターの特性・特徴だけでなく、製品の機能や組み合わせられる減速機の特徴などの知識も必要です。これらについては、カタログや取扱説明書をお読みいただき、ブラシレスモーターや他の速度制御用モーターを適確に使い分けいただければと思います。

このテクニカルマニュアルが、現状の問題解決や新しい装置開発のヒントにつながり、お読みいただいた方々のお役に立つことができれば幸いです。



オリエンタルモーター株式会社