

# ブラシレスモーター BLH シリーズ ドライバの性能向上

村上 彰吾

**BLH** シリーズは装置内部への設置に適した DC 電源入力タイプの小型ブラシレスモーターです。2006 年の発売以降、装置の小型化を検討しているお客様を中心に幅広く採用されてきました。一方、アプリケーションの変化や多様化に伴ってモーターの使用方法やニーズは年々変化しています。これからもより多くのお客様に使用いただくため、ドライバの性能向上を行いました。特に「速度追従性の向上」と「低騒音化」に注力しており、モーター制御にベクトル制御の正弦波駆動方式を採用することにより、これらを実現しました。その他にもサポートソフト **MEXE02** に対応することにより、デジタル設定やトルク管理が可能となりました。

本稿では、**BLH** シリーズのドライバの性能向上に向けて採用した技術について説明します。

## 1. はじめに

アプリケーションの変化や多様化に伴い、ブラシレスモーターの使用方法やニーズは年々変化しています。特に、無人搬送車 (AGV) をはじめとした速度追従性が求められる機器や、理化学機器などの静音性が求められる機器への採用が増えています。

変化した市場要望に応えるため、DC 電源入力タイプの小型ブラシレスモーター **BLH** シリーズに新たなドライバを開発し、ラインアップに追加しました (以下、**BLH2D**)。 **BLH2D** は「速度追従性」と「低騒音化」を中心とした性能向上を図ったドライバです。(図1、図2参照)

本稿では性能向上に向けて採用した技術を説明します。

**BLH2D** は、「アナログ設定タイプ」と「デジタル設定タイプ」、「RS-485 通信タイプ」の3タイプがありますが、ここでは「デジタル設定タイプ」について説明します。

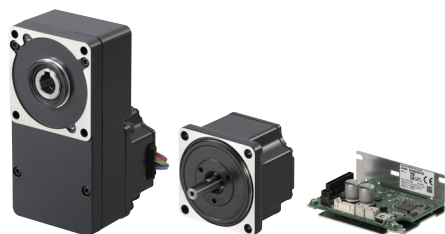


図1 BLH シリーズ



従来品 (50 W)      BLH2D (デジタル設定タイプ)

図2 BLH ドライバ外観比較

## 2. モーター制御

### 2.1. ベクトル制御の採用

従来品は、モーター電流の位相を制御していませんでしたが、**BLH2D** はモーター制御方式にベクトル制御を採用することで電流位相を制御しています。これにより、回生電力の処理やトルク制限機能を実現しました。ベクトル制御では、正弦波の電流をモーターに流す必要があるため、モーター駆動方式も従来品の矩形波駆動方式から正弦波駆動方式に変更しています。

ベクトル制御について、図3を用いて説明します。ベクトル制御ではモーターのステーターに $\alpha$ 軸と $\beta$ 軸からなる座標を、ローターに $d$ 軸と $q$ 軸からなる座標を置いて考えます。ステーターのU相がつくる磁束の方向を $\alpha$ 軸、 $\alpha$ 軸に直交する方向を $\beta$ 軸、ローターのマグネットがつくる磁束の方向を $d$ 軸、 $d$ 軸に直交する方向を $q$ 軸と定義します。また、モーター電流を $I$ 、 $d$ 軸と電流 $I$ のなす角を $\theta$ とします。

ベクトル制御ではモーター電流を $d$ 軸方向に流す電流 $I_d$ と $q$ 軸方向に流す電流 $I_q$ の2成分で表現します。 $I_d$ はマグネットの磁束と対向する方向に磁束を発生させ、 $I_q$ はマグネットの磁束に対して直交する方向に磁束を発生させます。よって、トルクの大きさは $q$ 軸電流の大きさで決まります(式1参照)。なお、**BLH2D** は $d$ - $q$ 座標の電流ベクトル $I$ を常に $q$ 軸方向に保つように制御することで( $\theta=90^\circ, -90^\circ$ )、高効率駆動を実現しています。

また、ベクトル制御はローターの位置を基準にモーター電流の大きさをフィードバック制御するために、ローターの正確な位置を検出する必要があります。しかし、**BLH** シリーズのモーターのセンサにはホール IC を使用しており、

分解能は30 P/Rです。ベクトル制御を行うには分解能が低く、ローター位置の補間が必要です。BLH2DはホールICの出力するパルス間隔から算出した回転速度を使用し、ローター位置の補間を行っています(図4参照)。これにより、ベクトル制御を実現しました。

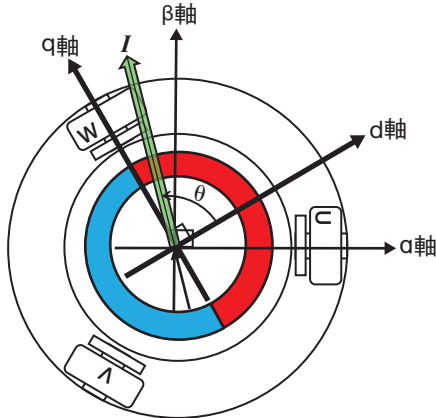


図3 ベクトル制御

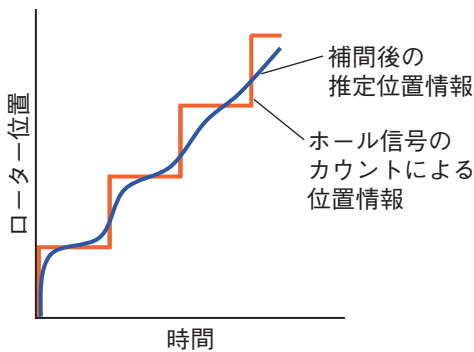


図4 位置情報の補間

$$T = K_t I_q \dots\dots\dots (1)$$

- T: モーターの発生トルク [N・m]
- K<sub>t</sub>: トルク定数 (モーターの構造によって決まる定数)
- I<sub>q</sub>: q 軸電流 [A]

### 2.2. 4象限運転の対応

4象限運転について図5を用いて説明します。横軸は回転速度、縦軸はトルクを示しており、CW方向を正としています。モーターの回転方向(CW、CCW)トルク方向(CW、CCW)の組み合わせで4種類の運転状態が考えられ、回転方向とトルクの向きが一致した状態を力行(りきこう)状態、回転方向とトルクの向きが逆になった状態を回生状態といいます。

従来品は第2象限と第4象限の駆動ができないため、制動運転ができません。減速動作はフリーランとなり、設定した減速停止時間よりも実際の減速時間が長引くことがありました。一方、BLH2Dは4象限すべてでモーターを駆動することができるので、制動運転が可能です。制動運転に対応したことで、減速時における速度追従性の向上と変速時の速度のオーバーシュート低減を実現しました。

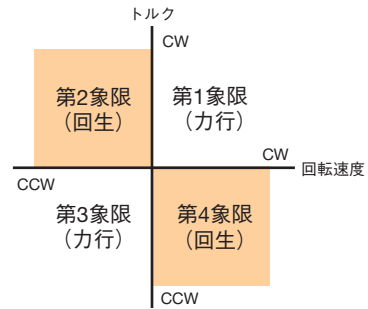


図5 4象限運転

### 2.3. トルク制限、負荷率表示

BLH2Dでは発生トルクの上限に制限をかけるトルク制限機能と、発生トルクを確認できる負荷率表示機能を追加しました。

2.1で述べたように、ベクトル制御ではq軸電流の大きさで発生トルクを制御できます。これによって、トルク制限機能を実現しました。また、q軸電流の大きさから発生トルク(負荷率)を算出しています。ここで算出した負荷率は、サポートソフト**MEXE02**のステータスマニタ機能から確認できます。(図6参照)

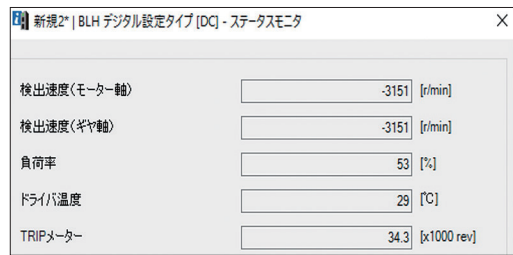


図6 MEXE02 ステータスマニタ

### 3. 制動運転時の回生電力への対応

制動運転を行うとモーターが回生状態となり、発電機として動作します。このとき、回生電力が発生するため、その処理を考える必要があります。

一般的なスイッチング電源は電力が返されることを想定しておらず、回生電力により出力電圧が上昇し過電圧アラームが発生することがあります。そのため、回生電力を消費する機能を有していないドライバとスイッチング電源を組み合わせる場合は、必要以上の容量の電源を使用するなどの対応を行ってきました。

近年スイッチング電源の小型化・高効率化が進み、出力コンデンサの小型化や、無負荷時にスイッチングを止める機能を搭載した電源が増えたことで、わずかな回生電力で出力が遮断されるなどのトラブルが増えました。その対策として、BLH2Dでは回生電力を電源に返さずにモーターで消費させる機能を搭載しました。

### 3.1. 回生電力による電圧上昇の抑制

回生電力を消費する方法としては、回生電力を抵抗器によって熱に変換する方法が一般的ですが、この方法は定格電力の大きい抵抗器の採用によってスペースを大きくとるデメリットがあります。ドライバサイズを従来品と同等にするために、BLH2D デジタル設定タイプでは、モーターで回生電力を消費する回生電圧抑制制御を採用しています。

図7にCW方向回転中に減速停止を行ったときの動作について示します。通常状態( $\theta = -90^\circ$ )のモーター電流を  $I$ 、回生電力消費時( $\theta = -90^\circ + \theta_c$ )のモーター電流を  $I'$  とします。ベクトル制御において、モーターで回生電力を消費する場合はq軸に保っていた電流ベクトルをd軸方向に傾けることで実現できます。d軸方向の電流は無効電力として消費されるため、発生した回生電力をモーターの発熱として消費しています。

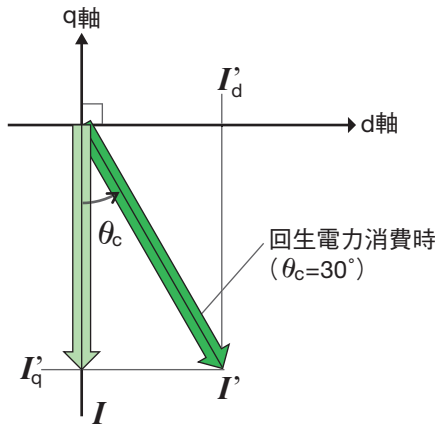


図7 回生電圧抑制制御

### 3.2. 減速停止動作

回生電力はバッテリーの充電などの目的で利用する場合もあります。その場合は、ドライバもしくはモーターで消費せずに電源側に回生電力を返す必要があります。

BLH2Dでは、使用する電源に合わせて回生電力の処理方法を選択する「減速停止動作選択」機能を搭載しました。減速停止動作は以降の3種類から選択できます。この機能を実現するため、電源入力部に電源遮断用のFETを搭載しています(図8参照)。

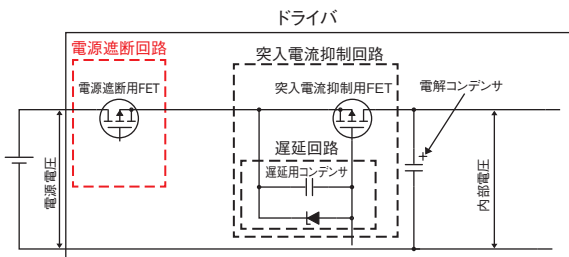


図8 電源入力部回路略図 電源遮断回路

#### 3.2.1. 減速停止1(回生電力を消費しながら減速)

「減速停止1」は、制動運転を行う減速方法です(図9参照)。減速時に発生する回生電力は前述した回生電圧抑制制御を行って消費するため、電源に回生電力は返しません。回生処理のメカニズムを以下に示します。

- 1) 回生状態になると、電源遮断用FETを直ちにOFFにします。これにより回生電力が発生しても電源側に逆流することはありません。
- 2) 回生電力により、内部電圧が上昇します。ここで回生電圧抑制制御を行い、モーター電流をd軸方向に流すことで、発生した電力をモーター内で消費させ、インバータ電圧を所定値より上昇しないようにします。

コンベアなどの回生電力が発生する運転条件で、スイッチング電源と組み合わせて使用する場合を想定した停止動作です。ただし、連続的に回生電力が発生する運転条件ではモーターの発熱が大きくなるため、注意が必要です。

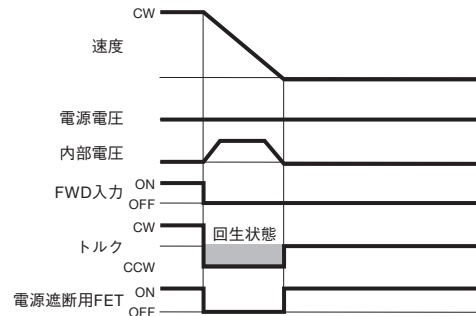


図9 減速時動作イメージ(減速停止1)

#### 3.2.2. 減速停止2(回生電力を発生させずに減速)

「減速停止2」は、回生電力が発生しないようにブレーキトルクを抑制する減速方法で、減速動作はフリーランとなります(図10参照)。回生電力が発生しないため、ドライバの内部電圧は上昇しません。

従来品との互換性を高めた停止方法です。従来品からの置き換えや、停止時にブレーキトルクを発生させたくない場合の使用を想定しています。

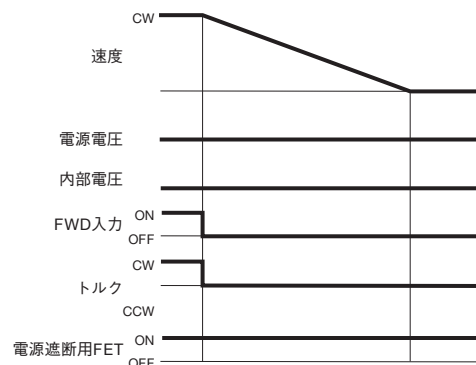


図10 減速時動作イメージ(減速停止2)

### 3.2.3. 減速停止3(回生電力を消費せずに減速)

「減速停止3」は、制動運転を行う減速方法ですが、「減速停止1」と異なり、回生電圧抑制制御は行わず、発生した回生電力はすべて電源側に返します(図11参照)。したがって、電源電圧および内部電圧は電源の回生処理能力に依存して変動しますが、バッテリーなどの回生電力を処理できる電源であれば、電源電圧と内部電圧は上昇しません。

回生電力を処理できる電源と組み合わせれば、AGVで傾斜を下るときのような連続的に回生電力が発生する運転条件での使用も可能です。

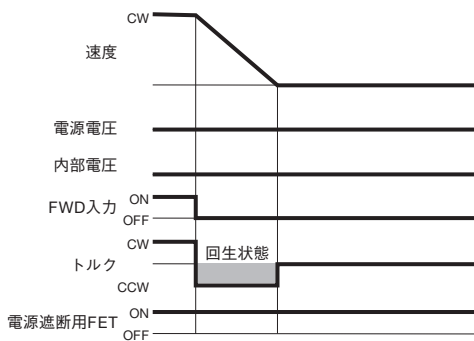


図11 減速時動作イメージ(減速停止3)

## 4. 突入電流の対策

BLHシリーズに組み合わせる電源としてバッテリーが採用される場合、懸案として電源投入時の突入電流が挙げられます。

電源投入時はドライバ内部のコンデンサは充電されておらず、コンデンサに電圧が印加された瞬間に大きな突入電流が流れます。これにより、電源投入に使用しているリレー接点が溶着する場合があります。

BLH2Dでは突入電流抑制回路を追加し、ドライバ内部の電解コンデンサに印加される電圧を緩やかに上昇させることで突入電流が抑制されるようにしました。これにより、電源投入時に発生する突入電流は従来品の5%まで抑制できました。

追加した突入電流抑制回路は、電源入力部に突入電流抑制用FETを設けています。ゲートソース間に接続した遅延用コンデンサを徐々に充電することにより電解コンデンサへの印加電圧を緩やかに上昇させています(図12参照)。

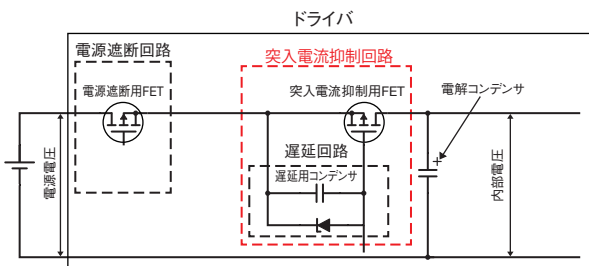


図12 電源入力部回路略図 突入電流抑制回路

## 5. 低騒音化

BLH2Dの駆動方式に正弦波駆動方式を採用したことにより低騒音化が実現できました。図13に示すように、矩形波駆動方式の従来品と正弦波駆動方式のBLH2Dでは、モーター電流波形が大きく異なります。モーター電流が急峻に変化している従来品に対してBLH2Dは滑らかに変化しており、これが回転振動や表面振動の低減につながっています。

図14、図15に従来品とBLH2Dで、それぞれ同一のモーター(BLHM450K-A)を駆動したときのモーター表面振動をトラッキング解析した結果を示します。測定は、ラジアル方向の振動に対して実施しました(図16参照)。横軸は周波数成分、縦軸はモーターの回転速度、色は振動の大きさを示しており、振動が大きいと赤色に、小さいと青色となります。この結果より、従来品よりもBLH2Dの方が可聴周波数の20 Hz~20 kHzの振動が低減できていることが読み取れます。このことから、低騒音化が実現できていることが分かります。

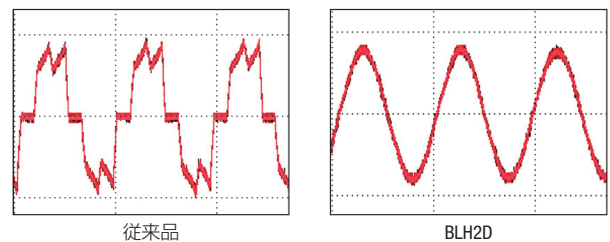


図13 モーター電流波形(縦軸:電流、横軸:時間)

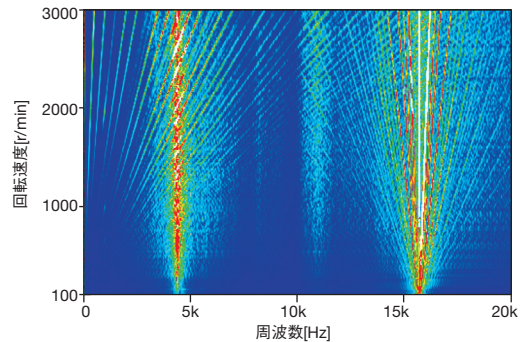


図14 モーター振動トラッキング解析結果 (ドライバ:従来品、モーター:BLHM450K-A)

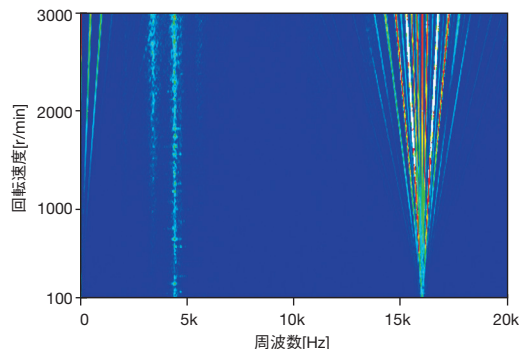


図15 モーター振動トラッキング解析結果 (ドライバ:BLH2D、モーター:BLHM450K-A)

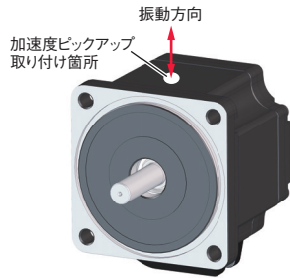


図 16 トラッキング解析 測定箇所

## 6. 短時間運転領域の拡大

図 17、図 18 に従来品と BLH2D の短時間運転領域の比較図を示します。BLH2D の瞬時最大トルクは従来品に対して 30 W は 15 %、50 W は 20 % 向上しています。これにより BLH2D は、従来品よりも短時間運転領域を拡大できました。

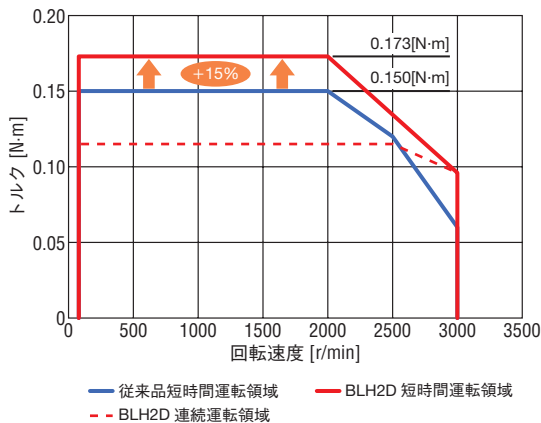


図 17 瞬時最大トルク比較 (30 W)

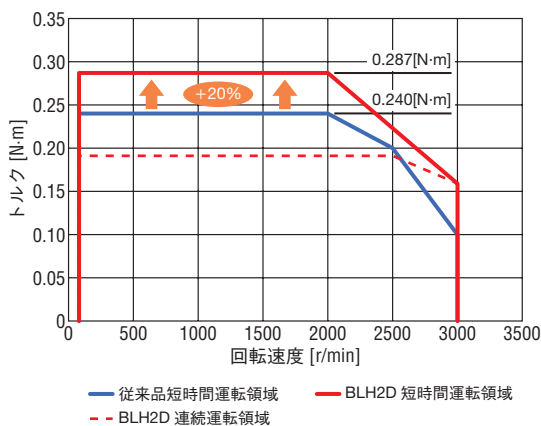


図 18 瞬時最大トルク比較 (50 W)

## 7. シリーズラインアップ

BLH2D は、「アナログ設定タイプ」「デジタル設定タイプ」「RS-485 通信タイプ」の 3 タイプがあり、お客様の用途に合わせてドライバを選択できます。ここまでは、「デジタル設定タイプ」を前提に説明しました。

### 7.1. アナログ設定タイプ

従来品と同様に回転速度の設定は、可変抵抗器や外部直流電源によるアナログ設定のみに対応しています。電源ケーブル、I/O ケーブル、モーターケーブル共に従来品と互換です。減速停止動作は、従来品同様にフリーランとなります。

### 7.2. デジタル設定タイプ

MEXE02 を使用することで、USB 通信によって PC から設定が可能な製品です。減速停止動作選択機能やトルク制限機能をはじめとしたさまざまな機能に対応しています。I/O 点数の拡張や、PWM 入力による回転速度の設定など、インターフェースに関しても使い勝手を向上しています。従来品同様に、回転速度やトルク制限値をアナログ設定できます。

### 7.3. RS-485 通信タイプ

デジタル設定タイプに RS-485 通信機能 (Modbus RTU モード) を追加した製品です。ドライバの状態を常時監視したい場合や、省配線を検討している場合に適しています。I/O 点数が従来品と同じため、従来品やアナログ設定タイプからの置き換えの場合 RS-485 通信ケーブル以外はそのまま使用できます。

## 8. まとめ

BLH シリーズを今後も幅広く使用していただけるように「速度追従性」と「低騒音化」をはじめとした性能向上を行いました。ドライバサイズを維持しているため従来品からドライバを置き換えるだけでこれらの性能向上を実現できることも、本製品の強みです。

技術的進歩に伴い、アプリケーションは変化し続けています。特にネットワーク技術に関わる進歩は著しく、工場の自動化や IoT による予知保全は、第 5 世代移動通信システムの導入によって、さらに普及していくことが想定されます。モーター制御の分野でも技術的進歩や多様化の著しいネットワークへの対応や、特性の向上が求められていくものと思われます。

今後もオリエンタルモーターは、変化し続けるニーズに応えられるよう製品開発を続け、技術の発展に貢献します。

参考文献

---

- (1) 飯田敏充・佐藤晋治,「高出力・DC電源入力ブラシレスモーターユニット**BLV**シリーズの開発」,RENGA, No.175, (2011), pp.4-9
- (2) 百目鬼英雄,「電動モータードライブの基礎と応用」, (2010), 技術評論社
- (3) 株式会社JSOL,「モーター設計初心者のための永久磁石同期モーター設計入門」, (2016), JSOL出版

筆者



村上 彰吾

制御機器システム事業部