

無刷馬達 BLH 系列 驅動器性能提升

村上 彰吾

BLH 系列為 DC 電源輸入型的小型無刷馬達，適合設置於設備內部。自從 2006 年發售後，主要廣受檢討設備小型化的客戶所採用。另一方面，伴隨應用的變化及多樣化，馬達的使用方法及需求逐年變化。為了未來能讓更多客戶使用，針對驅動器性能進行了提升。特別對馬達控制採用向量控制的正弦波驅動方式，實現「提升速度追蹤性」及「降低噪音化」。除此之外，也支援資料設定軟體 **MEXE02**，可進行數位設定或轉矩管理。

本資料說明提升 **BLH** 系列驅動器性能所採用的技術。

1. 前言

伴隨應用的變化或多樣化，無刷馬達的使用方法或需求逐年變化。特別是在以無人搬運車 (AGV) 為主，要求速度追蹤性的機器，或理化學機器等要求靜音性的機器，使用數量大幅增加。

為了回應市場需求變化，對 DC 電源輸入型的小型無刷馬達 **BLH** 系列開發新的驅動器，增加產品種類 (以下稱 **BLH2D**)。**BLH2D** 為以「速度追蹤性」及「降低噪音」為中心，提升性能的驅動器。(參照圖 1、圖 2)

本資料說明提升性能所採用的技術。

BLH2D 雖有「類比設定型」、「數位設定型」、「RS-485 通訊型」3 種類型，此處針對「數位設定型」進行說明。

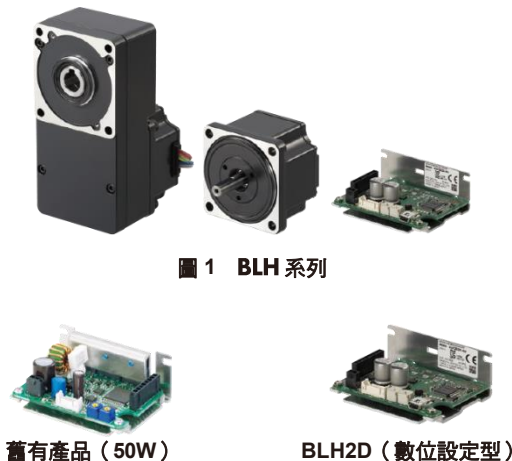


圖 1 BLH 系列

圖 2 BLH 驅動器外觀比較

2. 馬達控制

2.1. 採用向量控制

舊有產品並未控制馬達電流的相位，而 **BLH2D** 的馬達控制方式則採用向量控制，能控制電流相位。藉此實現再生功率的處理及轉矩限制功能。向量控制必須以正弦波電流對馬達通電，因此馬達的驅動方式也由舊有產品的矩形波驅動方式變更為正弦波驅動方式。

關於向量控制，使用圖 3 說明。向量控制的思考方式是將 α 軸及 β 軸構成的座標放在馬達的定子， d 軸及 q 軸構成的座標放在轉子。將定子 U 相產生的磁束方向定義為 α 軸，與 α 軸垂直方向為 β 軸，轉子的永久磁鐵產生的磁束方向為 d 軸，與 d 軸垂直方向為 q 軸。此外，馬達電流為 I ， d 軸與電流 I 形成的角度為 θ 。

在向量控制中，將馬達電流區分為往 d 軸方向的電流 I_d 及往 q 軸方向的電流 I_q 共 2 種成分。 I_d 產生與永久磁鐵磁束反方向的磁束， I_q 產生與永久磁鐵磁束垂直方向的磁束。因此，轉矩的大小將由 q 軸電流的大小決定 (參照公式 1)。此外，由於 **BLH2D** 持續將 d - q 座標的電流向量 I 控制保持在 q 軸方向 ($\theta=90^\circ$ 、 -90°)，因此可實現高效率驅動。

另外，向量控制會以轉子的位置為標準將馬達電流的大小實施回授控制，因此必須正確檢知轉子的位置。但是，**BLH** 系列的馬達檢知器使用霍爾 IC，解析度為 30P/R。由於作為向量控制的解析度過低，必須對轉子位置實施插補。**BLH2D** 使用由霍爾 IC 輸出的脈波間隔計算的轉速，對轉子位置進行插補 (參照圖 4)。藉此實現向量控制。

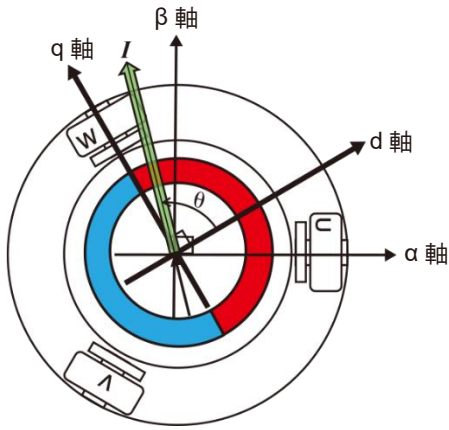


圖 3 方向控制

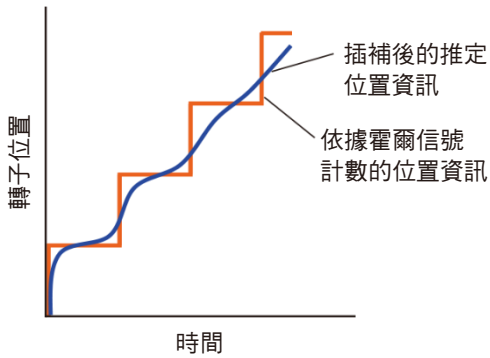


圖 4 位置資訊插補

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

T : 馬達的發生轉矩 [N·m]

K_t : 轉矩常數 (依據馬達構造決定的常數)

I_q : q 軸電流 [A]

2.2. 支援 4 象限運轉

關於 4 象限運轉，使用圖 5 說明。橫軸代表轉速，而縱軸則代表轉矩，以 CW 方向為正向。依照馬達運轉方向 (CW、CCW) 與轉矩方向 (CW、CCW) 的組合，共有 4 種運轉狀態，當運轉方向與轉矩方向一致時稱為力行狀態，運轉方向與轉矩方向相反時稱為回生狀態。

舊有產品由於不能驅動第 2 象限及第 4 象限，因此無法剎車運轉。減速動作時會成為空轉，實際的減速時間會高於設定的減速停止時間。另一方面，BLH2D 可在 4 象限所有範圍內驅動馬達，因此可以剎車運轉。由於對應剎車運轉，可提高減速時的速度追蹤性及減低變速時速度的過衝 (OVERSHOOT)。

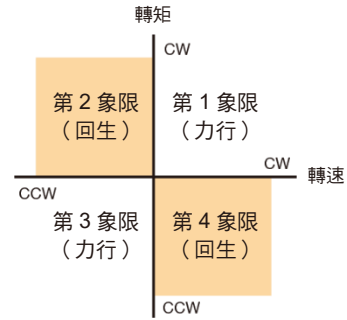


圖 5 4 象限運轉

2.3. 轉矩限制、負載率顯示

BLH2D 有追加了限制發生轉矩上限的轉矩限制功能及能確認發生轉矩的負載率顯示功能。

如 2.1 所述，向量控制是以 q 軸電流的大小控制發生轉矩。藉此實現了轉矩限制功能。此外，我們也算出由 q 軸電流大小的發生轉矩 (負載率)。此處計算的負載率，可由資料設定軟體 **MEXE02** 的狀態監視功能確認。(參照圖 6)

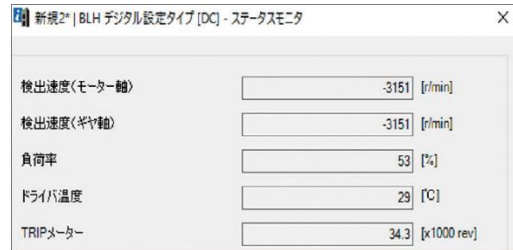


圖 6 MEXE02 的狀態監視

3. 支援剎車運轉時的回生功率

剎車運轉時馬達成為回生狀態，以發電機動作。此時，由於會發生回生功率，必須考慮如何處理。

一般的開關電源並未預期電力回流，會因為回生功率導致輸出電壓上昇而發生過電壓 Alarm。因此，若要將不具備消耗回生功率功能的驅動器與開關電源組合使用時，以往的因應方式都必須使用遠高於必要容量的電源。

由於近年開關電源逐漸小型化、高效率化，輸出電容器小型化及搭載無負載時停止開關功能的電源增加，導致只要有些許回生功率輸出，就導致阻隔的問題不斷增加。BLH2D 採取的對策是搭載不將回生功率送回，而由馬達消耗的功能。

3.1. 藉由回生功率抑制電壓上升

一般而言，消耗回生功率的方法，可使用電阻器將回生功率轉換為熱能，但如果使用額定電力大的電阻器則會有佔據空間的缺點。為了使驅動器尺寸與舊有產品相等，BLH2D 數位設定型採用回生電壓抑制控制，以馬達消耗回生功率。

圖 7 顯示 CW 方向運轉中實施減速停止的動作。一般狀態 ($\theta=90^\circ$) 的馬達電流為 I 、回生功率消耗時 ($\theta=90^\circ+\theta_c$) 的馬達電流為 I' 。向量控制下，馬達消耗回生功率時，會將保持在 q 軸的電流向量往 d 軸傾斜，以實現此功能。d 軸方向的電流會以無效電力的方式消耗，產生的回生功率會以馬達發熱的形式消耗。

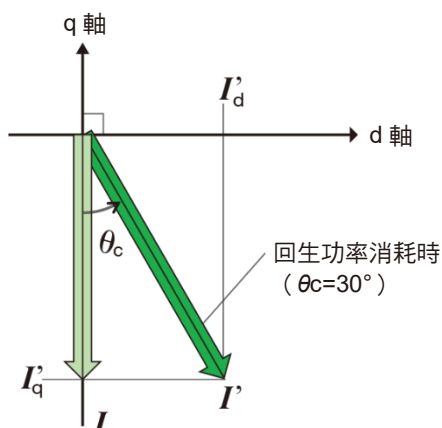


圖 7 回生電壓抑制控制

3.2. 減速停止動作

回生功率有時會被使用於電池充電的目的。此時，驅動器或馬達不會消耗回生功率，而會將回生功率送回電源側。

BLH2D 搭載「減速停止動作選擇功能」，可搭配使用電源選擇回生功率的處理方法。減速停止動作可選擇以下 3 種。為了實現此功能，電源輸入部搭載電源阻隔用的 FET (參照圖 8)。

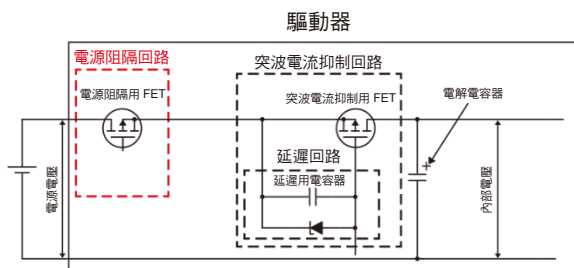


圖 8 電源輸入部回路略圖 電源阻隔回路

3.2.1. 減速停止 1 (減速時同時消耗回生功率)

「減速停止 1」是實施剎車運轉的減速方法 (參照圖 9)。會執行前述的回生電壓抑制控制，消耗減速時發生的回生功率，因此回生功率不會回到電源。回生處理的機制如下所示。

- 1) 成為回生狀態時，會立即切斷電源阻隔用 FET。因此，即使發生回生功率也不會逆流回電源側。
- 2) 藉由回生功率，讓內部電壓上升。在此處執行回生電壓抑制控制，將馬達電流往 d 軸方向傳送，讓發生的電力在馬達內消耗，使變頻器電壓不要上升超過規定值。

此停止動作預期是用於輸送帶等會發生回生功率的運轉條件，且與開關電源組合使用時。但必須注意，若為連續發生回生功率的運轉條件，馬達發熱量將會變大。

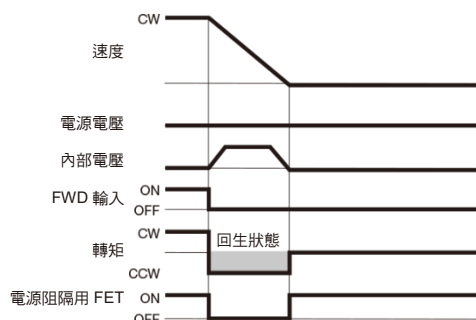


圖 9 減速時動作示意圖 (減速停止 1)

3.2.2. 減速停止 2 (減速時不發生回生功率)

「減速停止 2」是為了不發生回生功率而抑制剎車轉矩的減速方法，在減速動作時為空轉 (參照圖 10)。由於不會發生回生功率，驅動器的內部電壓不會上升。

這是提高與舊有產品互換性的停止方法。預計可在舊有產品更換及不想在停止時發生剎車轉矩時使用。

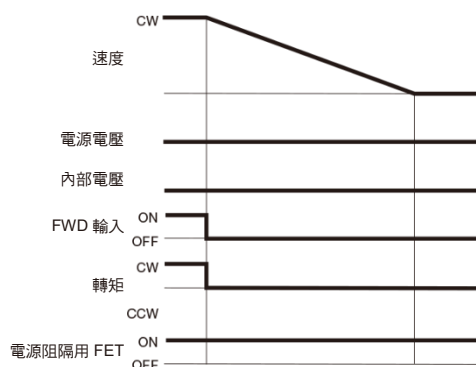


圖 10 減速時動作示意圖 (減速停止 2)

3.2.3. 減速停止 3 (減速時不消耗再生功率)

「減速停止 3」雖為執行剎車運轉的減速方法，但與「減速停止 1」不同，不執行回生電壓抑制控制，會將發生的回生功率全部傳回電源側 (參照圖 11)。因此，電源電壓及內部電壓雖會因電源的回生處理能力而變動，但若為電池等能處理回生功率的電源，電源電壓及內部電壓就不會上升。

若與能處理回生功率的電源組合，也可使用在如 AGV 下斜坡時，連續發生回生功率的運轉條件。

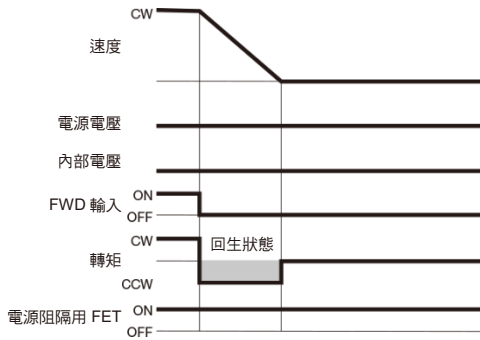


圖 11 減速時動作示意圖 (減速停止 3)

4. 突波電流的對策

與 BLH 系列組合使用的電源若採用電池時，其疑慮為電源起動時的突波電流。

當電源起動時，驅動器內部的電容器並未充電，當電容器被施加電壓的瞬間，會流過較大的突波電流。電源起動用的繼電器接點有時會因突波電流而融化並固著。

BLH2D 追加突波電流抑制回路，讓施加在驅動器內部電解電容器的電壓緩慢上升，以抑制突波電流。藉此，可將電源起動時發生的突波電流抑制在舊有產品的 5%。

追加的突波電流抑制回路在電源輸入部設置抑制突波電流用的 FET。對連接於閘極 (Gate) 與源極 (Source) 間的延遲用電容器緩慢充電，藉此讓電解電容器的施加電壓緩慢上升 (參照圖 12)。

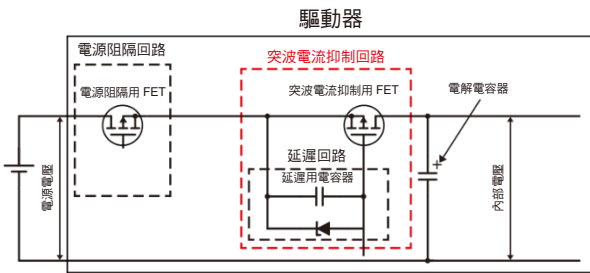


圖 12 電源輸入部回路略圖 突波電流抑制回路

5. 降低噪音化

BLH2D 的驅動方式採用正弦波驅動方式，藉此實現降低噪音化。如圖 13 所示，採用矩形波驅動方式的舊有產品及正弦波驅動方式的 BLH2D，馬達電流波形大大不同。相對於馬達電流急遽變化的舊有產品，BLH2D 則是滑順變化，這也能減低運轉振動及表面振動。

圖 14、圖 15 為舊有產品與 BLH2D 分別驅動相同馬達 (BLHM450K-A) 時，對馬達表面振動追蹤分析的結果。針對與軸心垂直方向的振動實施測量 (參照圖 16)。橫軸為頻率成分，縱軸為馬達轉速，顏色表示振動大小，振動大為紅色，振動小為藍色。依據此結果，可看出與舊有產品相比，BLH2D 能減低可聽音頻率的 20Hz~20kHz 的振動。由此，可了解能實現降低噪音化。

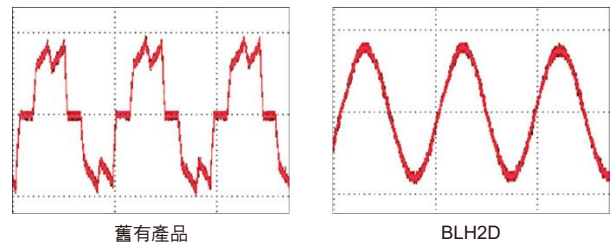


圖 13 馬達電流波形 (縱軸：電流，橫軸：時間)

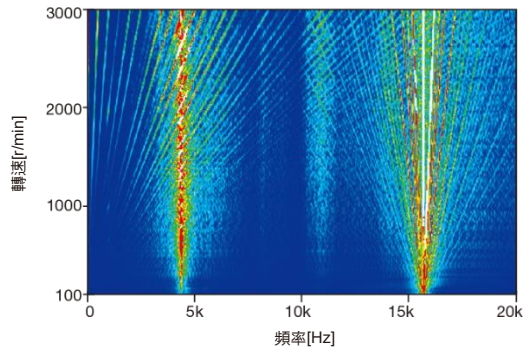


圖 14 馬達振動的追蹤分析結果 (驅動器：舊有產品、馬達：BLHM450K-A)

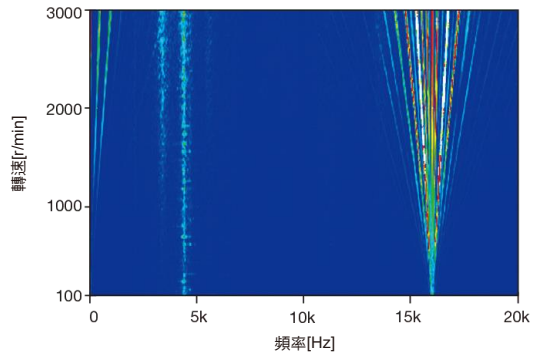


圖 15 馬達振動的追蹤分析結果 (驅動器：BLH2D、馬達：BLHM450K-A)

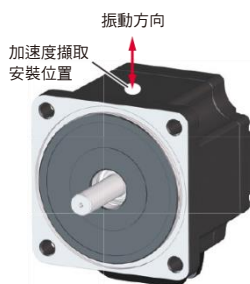


圖 16 追蹤分析 測量位置

6. 放大短時間運轉領域

圖 17、圖 18 為舊有產品及 BLH2D 的短時間運轉領域比較圖。BLH2D 的瞬間最大轉矩與舊有產品相比，30W 提高了 15%，50W 提高了 20%。藉此，BLH2D 比起舊有產品擴大了短時間運轉領域。

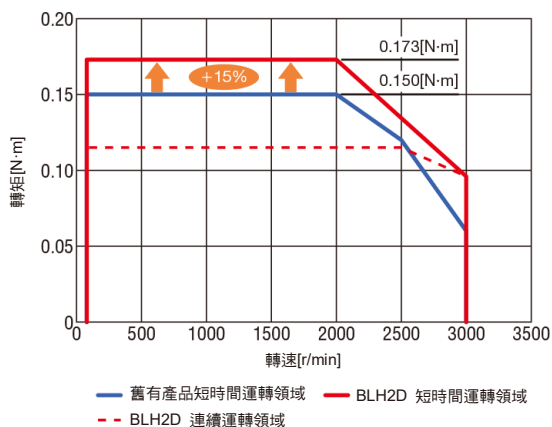


圖 17 瞬間最大轉矩比較 (30W)

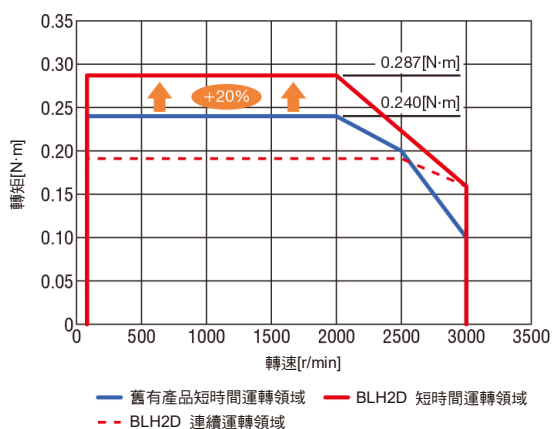


圖 18 瞬間最大轉矩比較 (50W)

7. 系列產品種類

BLH2D 有「類比設定型」、「數位設定型」、「RS-485 通訊型」3 種類型，客戶可配合用途選擇驅動器。到此為止以「數位設定型」為前提進行說明。

7.1. 類比設定型

與舊有產品相同，轉速設定只對應以可變電阻器及外部直流電源的類比設定。電源電纜線、I/O 電纜線、馬達電纜線都與舊有產品相容。減速停止動作與舊有產品相同為空轉。

7.2. 數位設定型

此產品可使用 **MEXE02**，透過 USB 通訊由 PC 進行設定。對應減速停止動作選擇功能及轉矩限制功能為主的各種功能。可擴充 I/O 點數或 PWM 輸入設定轉速等，提高介面的使用方便性。與舊有產品相同，可使用類比設定轉速及轉矩限制。

7.3. RS-485 通訊型

數位設定型追加 RS-485 通訊功能 (Modbus RTU 模式) 的產品。適合想隨時監視驅動器狀態或評估節省配線的情形。I/O 點數與舊有產品相同，若是由舊有產品或類比設定型更換時，除了 RS-485 通訊電纜線以外，可直接使用。

8. 總結

為了使 **BLH** 系列於今後能擴大使用，提升了「速度追蹤性」及「降低噪音」為主的性能。本產品的長處是維持驅動器尺寸不變，可直接更換舊有產品的驅動器，但又能實現上述性能提升。

隨著技術進步，應用也持續變化。特別是網路相關技術顯著進步，工廠自動化及依據 IoT 的預知保全，透過導入第 5 代移動通訊系統，預估能更加普及。馬達控制領域未來也將更加追求技術進步及對應多樣化的網路，並提高各種特性。

今後東方馬達將持續開發新產品，以滿足持續不斷變化的需求，並對技術發展做出貢獻。

參考文獻

- (1) 飯田敏充、佐藤晉治，「高輸出、DC 電源輸入無刷馬達組合 **BLV** 系列的開發」，RENGA，No.175，(2011)，pp.4-9
- (2) 百目鬼英雄，「電動馬達驅動器的基礎及應用」，(2010)，技術評論社
- (3) JSOL 股份有限公司，「馬達設計初學者的永久磁鐵同步馬達設計入門」，(2016)，JSOL 出版

作者



村上 彰吾

控制機器系統事業部