

Oriental motor

TECHNICAL MANUAL

技術手冊
無刷馬達篇



目錄

前言 5

1

無刷馬達類型 7

1.1 內轉子型 7
1.2 外轉子型 7
1.3 盤型轉子型 8

2

無刷馬達的結構和原理 9

2.1 直流馬達的結構和旋轉原理 9
2.1.1 直流馬達結構 9
2.1.2 直流馬達的旋轉原理 9
2.1.3 直流馬達特性 11
2.1.4 直流馬達特色 12
2.2 無刷馬達的結構和旋轉原理 13
2.2.1 無刷馬達結構 13
2.2.2 無刷馬達的旋轉原理 13
2.2.3 無刷馬達特性 15
2.2.4 無刷馬達特色 16
2.3 無刷馬達的主要元件 17
2.3.1 磁極檢測用部品 17
2.3.2 產生磁場的元件 19

3

無刷馬達驅動方式 21

3.1 馬達驅動方式 21
3.1.1 矩形波驅動方式(120° 傳導模式) 21
3.1.2 正弦波驅動方式 21
3.1.3 每種驅動方式的電流波形 22
3.2 驅動方式和馬達轉矩 23
3.2.1 矩形波驅動方式 24
3.2.2 正弦波驅動方式 25
3.3 電流控制方法 26
3.3.1 調製方法 26
3.3.2 正弦波驅動方式調製方法 27

4

無刷馬達的控制原理 29

4.1 基本驅動回路配置和角色 29
4.1.1 轉換器 29
4.1.2 速度控制器 29
4.1.3 速度轉換器 30
4.1.4 激磁信號發生器 30
4.1.5 電壓控制器 30
4.1.6 變頻器 30
4.2 速度控制方法 31
4.3 高精度驅動回路配置和角色 32
4.3.1 電流檢知器 32
4.3.2 轉子磁極位置計算器 32
4.3.3 電流控制器 32
4.4 轉矩控制方法 33
4.5 剎車(再生運轉) 33

目錄

5

無刷馬達中使用的技術	35
5.1 廣泛的速度控制範圍(低速運轉)	35
5.1.1 低頓轉設計	35
5.1.2 正弦波驅動	36
5.1.3 速度檢測精度	37
5.2 廣泛的速度控制範圍(高速運轉)	38
5.2.1 利用相位控制進行輸出轉矩校正	38
5.2.2 向量控制	39
5.2.3 弱磁場控制	42
5.3 高精度速度控制	43
5.3.1 速度變動率	43
5.3.2 高可靠度	44
5.4 穩定停止位置	45
5.4.1 過轉量	45
5.4.2 過轉量偏差	46
5.4.3 AC 調速馬達剎車方法	46
5.4.4 無刷馬達剎車方法	47
5.5 高效率、節能	48
5.5.1 馬達損失	48
5.5.2 銅損	48
5.5.3 鐵損	50
5.5.4 雜散負載損失	51
5.5.5 機械損	51
5.6 小型且輕量的馬達	52
後記	53

前言

馬達作為我們日常生活中各個方面的輔助裝置，被使用於家庭、商業設施、餐廳、汽車、工廠等場所當中。我們很少直接看到它們，但在移動物體的設備中會運用到各種不同功能和能力的馬達。本技術手冊主要說明一種馬達：無刷 DC 馬達。

無刷 DC 馬達在速度可控性和節能方面非常出色。相較於使用變頻器和點弧角控制來控制感應馬達速度的方法，無刷馬達可以在低速旋轉到高速旋轉的更大速度範圍內使用。此外，由於在轉子中使用永久磁鐵，而且不需像感應馬達一樣將電流導入轉子，因此無刷 DC 馬達不僅外型小巧，同時還具有高輸出和高效率的特點。

然而，由於需要轉子中的永久磁鐵、磁極檢知器及專用驅動回路，因此無刷 DC 馬達昂貴且應用有限。

近年來，隨著電子裝置的研發與電子部件整合的提升，驅動回路的成本得以降低尺寸也得以變小。此外，為了解決全球暖化問題，節能需求不斷增加，無刷 DC 馬達已廣泛應用於空調、冰箱、洗衣機等節能電器，以及用於電動車和混合動力汽車的驅動馬達和車用電動馬達。

外型小巧且高輸出的特點使其應用廣泛，包括用於電腦的冷卻風扇、硬碟驅動裝置和無人機。

本技術手冊旨在幫助讀者了解無刷 DC 馬達的原理和特性，並作為協助正確使用 AC 調速馬達、變頻器和其他調速馬達的參考。

在進入正文之前，讓我們簡要介紹無刷 DC 馬達與其先驅 DC 馬達的歷史。

最早的馬達是通過簡單的集中線圈，利用電磁鐵原理來使用的。後來，隨著以鐵氧體磁鐵為代表的永久磁鐵的發展，大部分的小型 DC 馬達開始以永久磁鐵取代電磁場，且至今仍廣泛使用。

為了解決 DC 馬達中電刷和整流器之間產生的電弧問題，以及維修作業和使用壽命問題，一直存在以回路取代電刷和整流器機械接觸的想法。然而，由於當時不存在功率電子技術，因此無法適當調整切換激磁的時間。在 1960 年代，由於電子技術的進步，創造出一種以電晶體開關取代電刷和整流器的無整流器馬達。對於這種類型的馬達考慮了多種商品名稱，最後基於改進的特性以及更新的結構和形狀，「無刷 DC 馬達」和「電子換向馬達」脫穎而出。然而，這種馬達的原理與同步馬達相同，而且它們之間的區別已經不明顯。

「無刷 DC 馬達」可使用交流和直流電源。由於「無刷 DC 馬達」這個名稱很容易讓人以為這種馬達只能使用直流電源，因此東方馬達採用「無刷馬達」一詞。

1 無刷馬達類型

無刷馬達結合永久磁鐵、線圈、磁極檢知器及驅動回路，以執行馬達的功能。由於機構上的限制較少，因此可設計出多種針對特定目的優化結構的專用馬達。我們將針對其中最具代表性的結構與特徵進行說明。

1.1 內轉子型

轉子位於定子內部，永久磁鐵安裝在轉子的表面上。由於轉子直徑小，慣性慣量小，因此加速和減速響應性極佳。此外，由於定子位置接近馬達表面，因此散熱性良好，使馬達具有外型小巧且高輸出的特性。

這是無刷馬達的典型配置，它們的用途非常廣泛。東方馬達的無刷馬達為內轉子型。

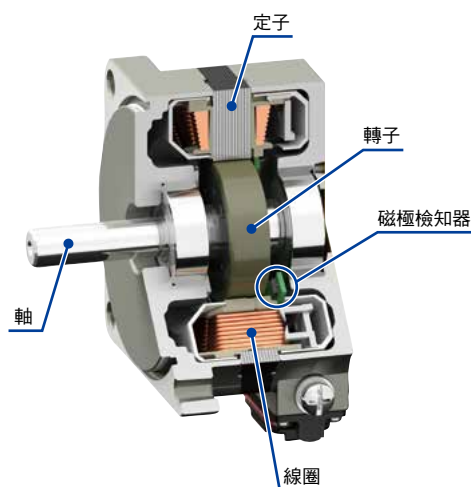


圖 1.1 內轉子型

1.2 外轉子型

轉子位於定子外部，永久磁鐵位於轉子內部，定子和永久磁鐵的位置與內轉子型相反。杯形轉子因為慣性慣量大，加速和減速響應性差，不適合靈活移動，但速度穩定性極佳。此類型用於保持固定轉速的無刷直流風扇。

因為轉子直徑大，所以可安裝比內轉子型更多的磁鐵，允許磁鐵多極化。這樣可以在外型小巧的情況下達到高輸出。然而，因為線圈位於內部，散熱性較差，所以線圈溫度容易升高，導致運作時間受到限制。在使用外轉子結構的無人機馬達中，轉子杯具有通風孔設計，螺旋槳產生的風可對線圈進行冷卻。

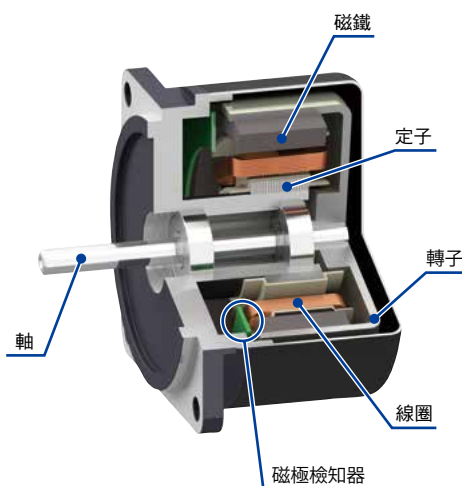


圖 1.2 外轉子型

1.3 盤型轉子型

線圈和磁極檢知器安裝在電路板上以形成定子。因為是使用板狀永久磁鐵，將其面朝定子設置於轉子表面上，所以這種類型的馬達很薄。用於在輕負載時保持穩定的固定速度。由於沒有軸，因此在轉子上安裝用於連接和斷開負載的附件。

這種類型的馬達用於硬碟驅動裝置，或 DVD、藍光光碟等其他媒體的磁碟驅動裝置。

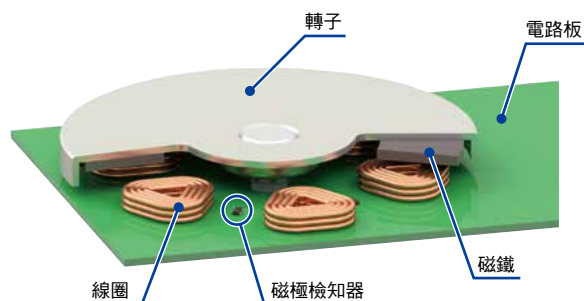


圖 1.3 盤型轉子型

2 無刷馬達的結構和原理

2.1 直流馬達的結構和旋轉原理

在說明無刷馬達之前，讓我們先介紹直流馬達（無刷馬達的先驅）的結構和旋轉原理。顧名思義，直流馬達（DC 馬達）是透過施加直流電壓造成旋轉的馬達。

2.1.1 直流馬達結構

直流馬達的一般結構如圖 2.1 所示。

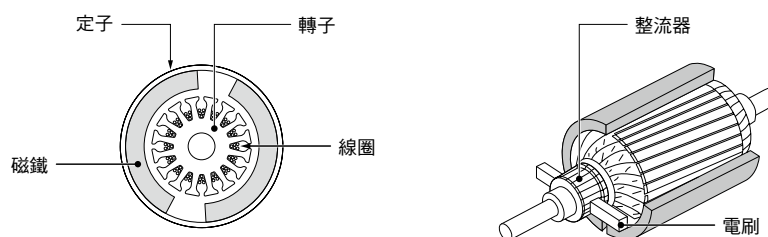


圖 2.1 直流馬達結構

永久磁鐵位於定子內，位於正中心的是包含線圈的轉子。轉子包含數個線圈，兩端都連接到整流器。電流經由與電刷接觸的整流器流過線圈。在此結構下，轉子旋轉會使電刷與整流器片交替位置，電流流經線圈的順序也會隨之交替，從而使其持續旋轉。

2.1.2 直流馬達的旋轉原理

我們現在將使用圖 2.2 中所示的弗萊明左手定則和圖 2.3 中所示的簡化模型來說明直流馬達的旋轉原理。

將電流導入磁場內設置的導體後，導體便會獲得力量（電磁力）。根據弗萊明左手定則，磁場、電流和電磁力的方向互相正交。

在這種條件下產生的電磁力與磁場強度、導磁率和電流值成正比。導磁率 μ 是表示物質可磁化的容易程度係數，而磁場強度 H 和導磁率 μ 的乘積稱為磁通量密度 B 。

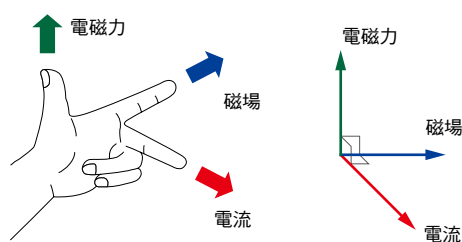


圖 2.2 弗萊明左手定則

在圖 2.3 所示的簡化模型中，放置一對永久磁鐵，使 N 極和 S 極面向彼此。一個線圈位於永久磁鐵之間，此結構可讓線圈沿點虛線自由旋轉。

線圈兩端都連接整流器，與電刷接觸。電刷連接到直流電源，電流從正極側供電，通過線圈並返回到負極側。

為了說明馬達的旋轉原理，假設圖 2.3 中顯示的線圈方向是起始點 (0°)。

1. 電流 i 經由電刷和整流器流到磁場內的線圈。
2. 根據弗萊明左手定則，電磁力 F 在 N 極側的導體向上移動，在 S 極側的導體向下移動，線圈順時針旋轉。

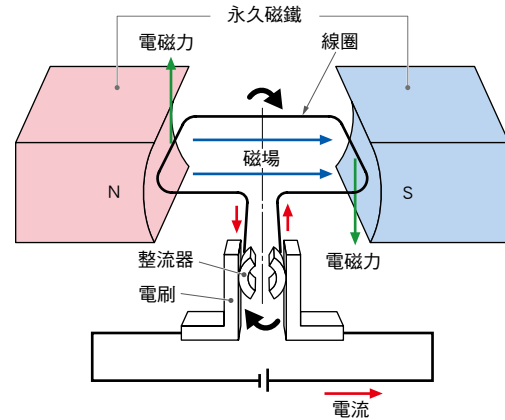


圖 2.3 直流馬達的簡化模型

3. 線圈旋轉並達到 90° 時，如圖 2.4 所示，整流器和電刷不再接觸，電流無法流動。電流不流動時，線圈仍會依慣性旋轉。

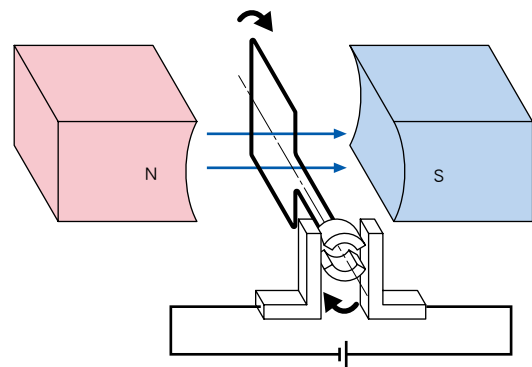


圖 2.4 90° 旋轉

4. 線圈依慣性旋轉時，整流器和電刷再次接觸，使電流流動並產生電磁力。當它旋轉到圖 2.5 所示的 180° 位置時，會進入圖 2.3 所示的相同狀態。

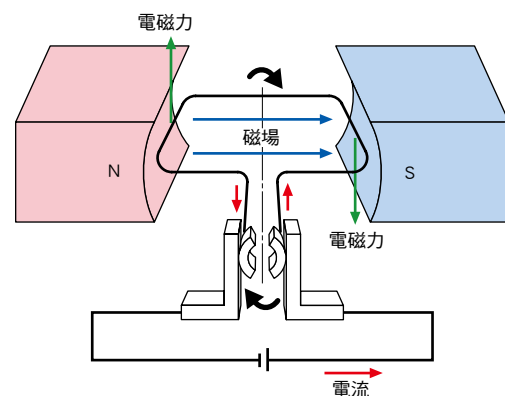


圖 2.5 180° 旋轉

如前所述，電刷與接觸的整流器片交換位置，流過線圈的電流方向隨之改變，在線圈中產生朝單一方向移動的電磁力。因此直流馬達會繼續旋轉。流過線圈的電流改變方向的現象稱為換流。



馬達轉矩

導體中產生的電磁力 F 、磁通量密度 B 及電流 i 的關係如下。

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

l : 橫穿磁場的導體長度

另外，假設從旋轉軸中心到導體的距離是 r ，因為可將線圈視為 2 個導體，所以作用在旋轉軸上的轉矩 T 如下。

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

根據公式 (2.1) 和公式 (2.2)，可以透過以下公式計算馬達產生的轉矩。

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

K_t : 轉矩常數

轉矩常數 K_t 是馬達的固定值。從公式 (2.3) 中，我們可以看到直流馬達的轉矩與電流彼此成比例。

2.1.3 直流馬達特性

直流馬達速度 - 轉矩特性如圖 2.6 所示。在無負載狀態(無負載施加到軸上)時達到最高速度，隨著負載轉矩增加，轉速會降低。馬達速度為零(軸處於固定狀態)時，會產生失速轉矩。

這個向右下方傾斜的特性稱為垂下特性。實際使用直流馬達時，根據此特性，若負載轉矩和馬達輸出轉矩達到平衡點時，馬達就會旋轉。例如，如果在電壓 V_1 的時候施加負載轉矩 T_L ，馬達將以轉速 N_1 旋轉。

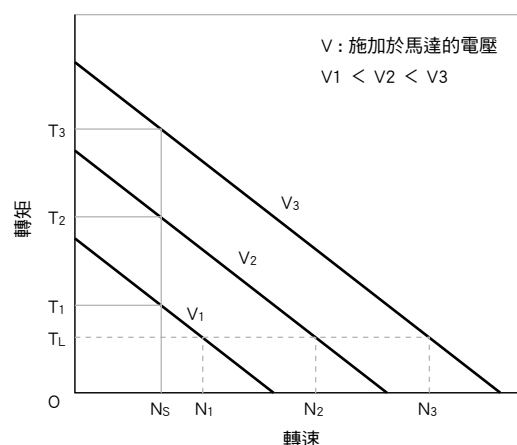


圖 2.6 轉速 - 轉矩特性

此外，如公式 (2.3) 所示，產生的轉矩與電流成比例。因此當施加電壓隨 $V_1 \rightarrow V_2 \rightarrow V_3$ 增加時，馬達電流也會增加，而速度 - 轉矩特性將改變。如果施加電壓在 T_L 的恆定負載轉矩下從 V_1 變成 V_2 ，然後變成 V_3 ，則轉速將從 N_1 變成 N_2 ，然後變成 N_3 。如果施加電壓為 V_1 ，且負載轉矩從 T_1 增加到 T_2 或 T_3 ，馬達將停止，但如果施加電壓從 V_1 變成 V_2 或 V_3 ，馬達產生的轉矩會變成 T_2 或 T_3 ，因此馬達可以在 N_s 的恆定轉速下運轉。

2.1.4 直流馬達特色

有刷直流馬達的特色如下所述。

- 優點

- 有 2 條導線，施加直流電壓足以旋轉。
- 反轉電源極性會反轉旋轉方向。
- 由於採用了永久磁鐵，使得直流馬達具有外型小巧、輕量、高效率的特徵。
- 起動轉矩大，可控性良好。
- 轉矩與電壓(電流)成比例。
- 可使用乾電池和蓄電池供電。
- 低成本

- 缺點

- 電刷磨損會縮短使用壽命。
- 產生機械滑動噪聲。
- 產生電子雜訊。

由於直流馬達只需連接直流電源即可運轉，因此得到廣泛應用。然而，由於電刷和整流器互相接觸滑動，導致電刷磨損，因此需要進行清理磨損粉、更換電刷等定期維修作業。隨著使用的馬達數量增加，維修作業難度提高，因此對壽命長，免維修馬達的需求越來越高。

2.2 無刷馬達的結構和旋轉原理

無刷馬達將被視為直流馬達缺點的電刷和整流器更換成電子元件，同時保有其良好的可控性。接下來，我們將說明無刷馬達的結構和旋轉原理的差異。

2.2.1 無刷馬達結構

轉子包含永久磁鐵，定子包含線圈，此結構與圖 2.1 所示的直流馬達中定子和轉子的位置完全相反。使用直流馬達時，流過線圈的直流會使轉子開始旋轉，電刷與其所接觸的整流器片的位置交替會改變流過線圈的電流方向，使馬達持續旋轉。

由於無刷馬達在不使用電刷或整流器的情況下換流，因此需要磁極檢知器(霍爾元件、霍爾 IC 等)來檢測永久磁鐵的磁極角位置，以及根據檢測到的磁極角位置引導電流流過線圈的驅動器。

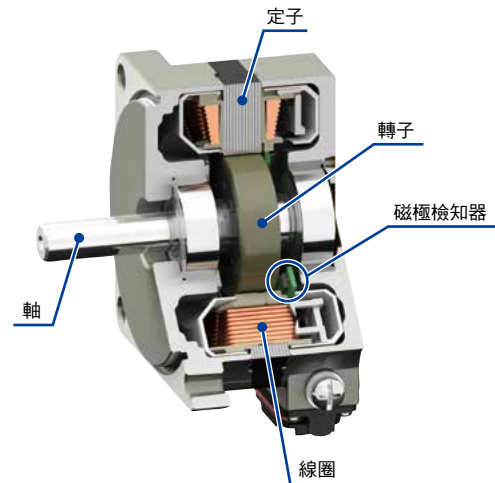


圖 2.7 無刷馬達結構

2.2.2 無刷馬達的旋轉原理

為了說明無刷馬達的旋轉原理，我們將使用圖 2.8 所示的簡化三相 2 極模型。

使用轉子磁鐵時，N 極和 S 極都具有 180° 的磁極角。磁極角檢知器 H_a 、 H_b 和 H_c 相隔 120° ，它們檢測轉子磁鐵的 N 極並輸出信號。

使用定子時，U 相線圈、V 相線圈和 W 相線圈相隔 120° ，並且偏移磁極檢知器 60° 。

對於每個定子的相位線圈，當電流從驅動回路流到馬達時，定子內徑側會產生 S 極。當電流反向流動時，定子內徑側會產生 N 極。圖 2.8 顯示電流從 U 相流向 V 相時的狀態。

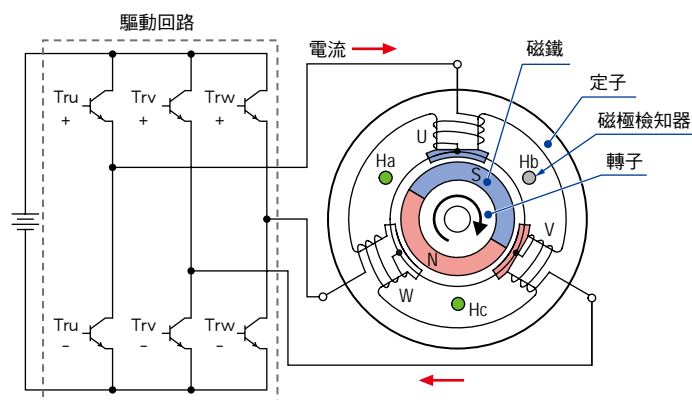


圖 2.8 無刷馬達的簡化模型

為了說明馬達的旋轉原理，我們使用圖 2.9 所示的旋轉順序，並假設圖 2.8 中顯示的轉子磁鐵方向是起始點 (0°)。

1. 在間隔 (a) 中，磁極檢知器 Ha 和 Hc 檢測 N 極並輸出信號。在這種情況下，如果電晶體 Tru+ 和 Trv- 開啟，定子中的電流會從 U 相線圈流到 V 相線圈。此時 V 相會被磁化成 N 極(激磁)，吸引轉子磁鐵中的 S 極並排斥 N 極。U 相會被磁化成 S 極(激磁)，排斥轉子磁鐵中的 S 極。這樣會使轉子順時針旋轉。
2. 在旋轉 60° 後的間隔 (b) 中，僅磁極檢知器 Ha 檢測 N 極並輸出信號。在這種情況下，如果電晶體 Tru+ 和 Trw- 開啟，定子中的電流會從 U 相線圈流到 W 相線圈。U 相被磁化成 S 極，吸引轉子磁鐵中的 N 極並排斥 S 極。W 相被磁化成 N 極，排斥轉子磁鐵中的 N 極。這樣會使轉子順時針旋轉。
3. 每旋轉 60°，磁極檢知器 Ha、Hb 及 Hc 的開啟和關閉狀態組合就會改變。隨著馬達每旋轉一圈，有 6 種不同的磁極檢知器輸出組合模式，以 (a) 到 (f) 表示。根據每個模式決定的激磁相來依序切換激磁，會連續產生旋轉磁場。

此外，依據磁極檢知器 Ha、Hb 及 Hc 的輸出組合，改變電流流過線圈的方式，可以反轉馬達旋轉方向。

例如，在上述間隔 2. (b) 中，僅磁極檢知器 Ha 檢測 N 極並輸出信號時，如果電晶體 Trv+ 和 Tru- 開啟，定子中的電流會從 V 相線圈流到 U 相線圈。此時 U 相會在 N 極激磁，吸引轉子磁鐵中的 S 極並排斥 N 極。V 相在 S 極激磁，排斥轉子磁鐵中的 S 極。這樣會使轉子逆時針旋轉。

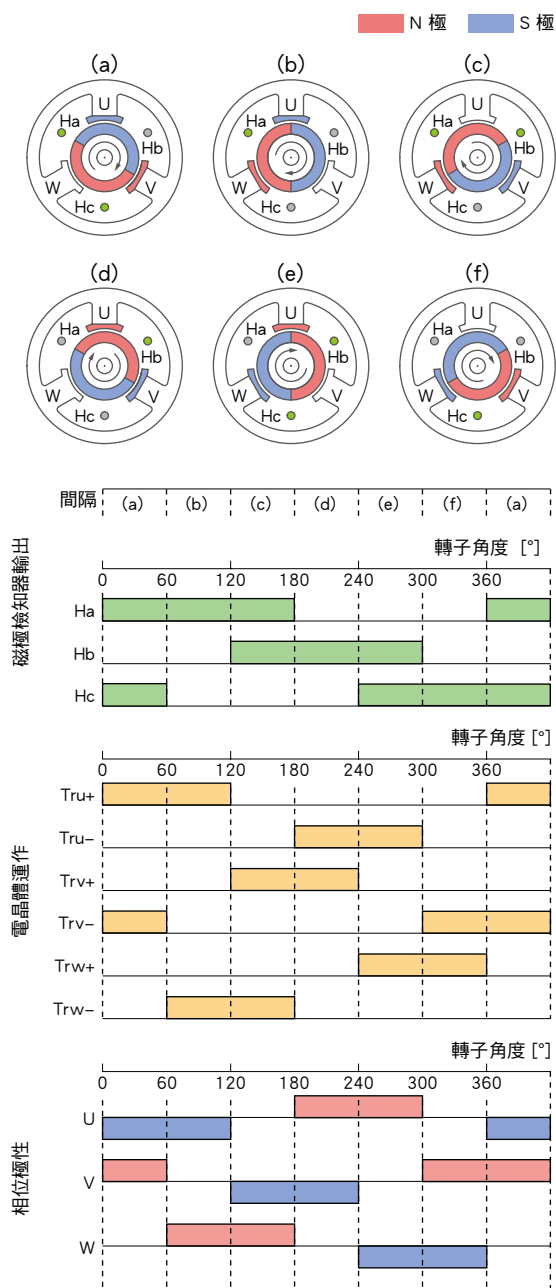


圖 2.9 旋轉順序

總之，無刷馬達根據磁極檢知器輸出信號使電流流過各相線圈，從而旋轉。



無刷馬達電流

雖然施加到無刷馬達驅動回路裡的是直流電壓，但流到馬達裡的卻是交流電流。因此無刷馬達有時被稱為交流同步馬達。

2.2.3 無刷馬達特性

如「2.2.1 無刷馬達結構」所述，無刷馬達的結構其實就是直流馬達的定子和轉子位置反過來的結構。因此，無刷馬達的基本速度 - 轉矩特性表現出與直流馬達相同的垂下特性，如圖 2.10 所示，而且馬達以與負載轉矩相對應的轉速旋轉。

如果速度減慢，則馬達產生的轉矩會增加，並且有與轉矩成比例的電流流動。如果大電流流動，馬達中的永久磁鐵磁力可能減小(退磁)，而且線圈可能過熱並燒毀。此外，驅動回路上的輸出元件和轉換器必須能夠處理大電流，因此驅動回路大且昂貴。

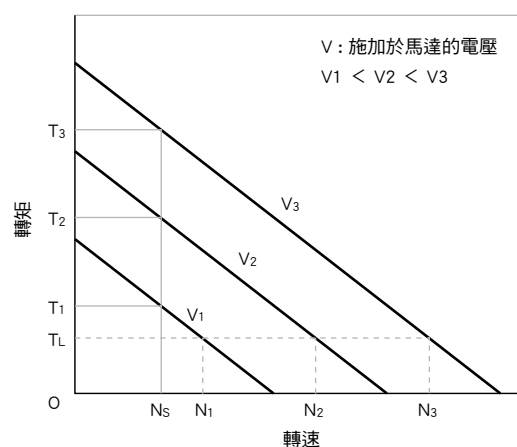


圖 2.10 轉速 - 轉矩特性

如果速度加快，則馬達產生的轉矩會減小，而且驅動所需的負載轉矩也會減小，導致不適合使用。以更高的速度運轉會增加與馬達所組合的減速機所發出的噪聲，還會導致減速機潤滑不足，從而影響使用壽命。

由於上述原因，無刷馬達通過驅動回路限制馬達的最大電流和最大轉速。因此東方馬達產品型錄中記載的速度 - 轉矩特性與圖 2.11 類似。

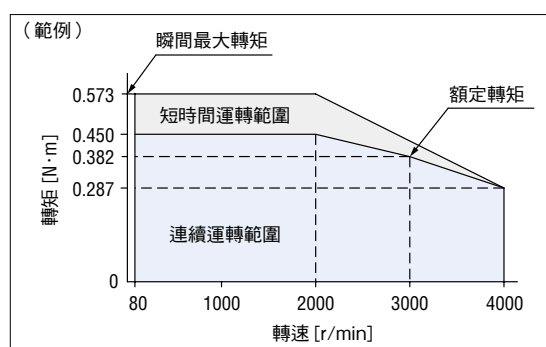


圖 2.11 轉速 - 轉矩特性

短時間運轉範圍
此區域包括短時間可使用的轉速和轉矩組合。
用於提高加速和減速期間的響應性。

連續運轉範圍
此區域包括連續運轉期間可使用的轉速和轉矩組合。



轉子磁鐵退磁

向磁鐵材料施加強磁場可磁化永久磁鐵。反之，使過大的電流流過馬達會讓定子產生反磁場，降低轉子磁鐵的磁力。這種現象稱為退磁。

東方馬達的馬達在設計上有防止由瞬間最大轉矩引發的電流所導致的退磁現象。

2.2.4 無刷馬達特色

無刷馬達的特色如下所述。

- 與直流馬達比較

- 速度 - 轉矩特性具有與直流馬達相同的垂下特性，而且可控性良好。
- 由於沒有電刷或整流器，因此不需要清理磨損粉、更換電刷或進行其他定期維修作業，使用壽命得以延長。
- 由於沒有電刷或整流器，因此不會因電弧而產生電子雜訊。(產生開關雜訊。)
- 不會產生機械滑動噪聲。
- 需要磁極檢知器和驅動器才能運轉。
- 由於從磁極檢知器輸出檢測馬達轉速並進行回授控制，因此速度精度高。
- 由於有回授控制，因此可以在運轉期間檢測到異常狀況。

- 與變頻器控制馬達和 AC 調速馬達相比

- 由於從低速到高速轉矩穩定，可實用的速度比大。
- 如果以相同的輸出比較，馬達外型小巧且高效率。
- 可使用直流電源。
- 因為從磁極檢知器輸出檢測馬達轉速並進行回授控制，所以速度精度高。
- 由於有回授控制，因此可以在運轉期間檢測到故障。

由於直流馬達價格低廉，因此可用於所需壽命較短的各種應用。然而，對於一般工業用途，不僅存在使用壽命和可維修性方面的問題，而且運作期間的速度精度、故障檢測等方面也需要高可靠度，因此無刷馬達日益普及。此外，由於馬達外型小巧，且具有高輸出、高效率的特性，因此常用於追求小型，輕量的裝置，以及電池供電的裝置。

2.3 無刷馬達的主要元件

接下來，我們將說明構成無刷馬達的主要部件。

2.3.1 磁極檢測用部件

a. 霍爾元件

霍爾元件是運用霍爾效應檢測轉子磁鐵的磁場和輸出信號的磁氣檢知元件。

受 N 極磁場影響的霍爾元件狀態如圖 2.12 所示。

如果電流從元件上部流動到下部，而且受到箭頭所示方向的 N 極磁場所影響，則元件內的電荷分佈會因為電磁力而不平衡。因此會產生垂直穿過電流和磁場的電動勢。

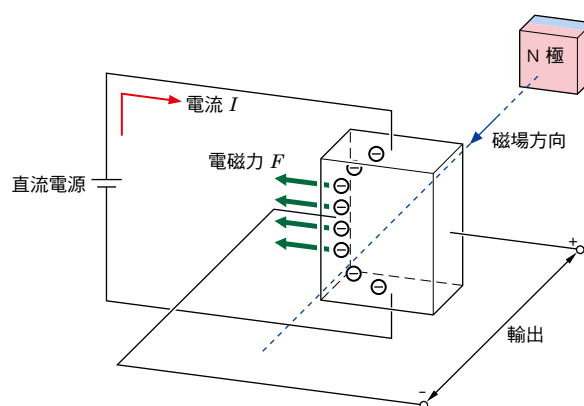


圖 2.12 霍爾元件檢測原理

霍爾元件輸出信號是數百 mV 的弱類比電壓。如果 N 極和 S 極隨馬達不斷換位，則如圖 2.14 所示，在磁場穩定的區域將有恆定輸出，而且在磁極交換的區域中將平緩改變。

由於信號微弱，因此在信號線長的情況下或存在大量電子雜訊的環境下容易受到雜訊的影響。霍爾 IC 整合了對霍爾元件輸出信號進行整形，放大和輸出的回路，用於解決雜訊問題。



霍爾效應的發現

在 1879 年，美國物理學家艾德華賀伯霍爾 (Edwin Herbert Hall) 發現霍爾效應。

對電流流過的物體垂直施加磁場，會產生垂直於電流和磁場的電動勢。霍爾元件是運用此原理的半導體。電動勢根據磁場強度不斷變化。

b. 霍爾 IC

霍爾 IC 是將霍爾元件和放大整形回路整合到一個封裝 (IC) 中的磁氣檢知器。圖 2.13 顯示霍爾 IC 的內部結構，圖 2.14 顯示霍爾 IC 輸出信號與霍爾元件輸出信號之間相對於轉子磁體磁場的關係。

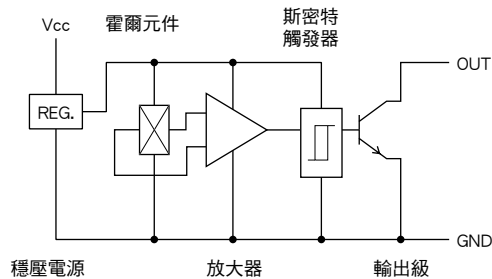


圖 2.13 霍爾 IC 方塊圖

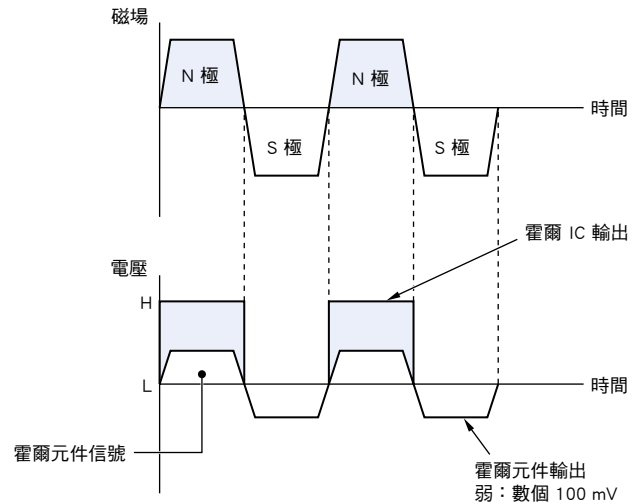


圖 2.14 霍爾 IC 輸出信號

由檢測磁場的霍爾元件產生的微弱輸出信號通過放大器進行放大，再以斯密特觸發器整形後輸出。如果轉子磁鐵的磁場強度超過霍爾 IC 臨界值，將輸出信號，如果低於臨界值，信號將停止。霍爾 IC 比霍爾元件輸出電壓具有較高的抗雜訊性，而且容易使用。

c. 編碼器

霍爾 IC 檢測轉子磁鐵的磁極並進行輸出，但編碼器透過受光元件將通過旋轉盤縫隙的光轉換為電氣信號，並且放大和整形信號後再輸出。

如圖 2.15 所示，編碼器具有用於檢測位置和速度的小縫隙 (A 相、B 相)，以及用於檢測磁極角位置的縫隙。用於檢測位置和速度的受光元件配置為與旋轉盤縫隙成 90° 電氣角的信號相位差。因此不僅可以準確檢測馬達轉速，還能準確檢測轉量和旋轉方向。

此外，3 個磁極位置檢測用狹縫和受光元件配置為 120° 電氣角的信號相位差，而且編碼器和轉子是分開的部件，因此轉子磁極位置的換位時間與磁極檢測信號不一致。為了使時間一致，安裝編碼器時必須調整磁極位置檢測用狹縫的位置。

東方馬達的產品配備附磁極檢測信號編碼器。由於可經由 A 相和 B 相信號精確檢測轉速和轉量，因此可在低速下進行穩定的速度控制，也能進行位置控制。(有關詳細資訊，請參閱「5.1.3 速度檢測精度」。)

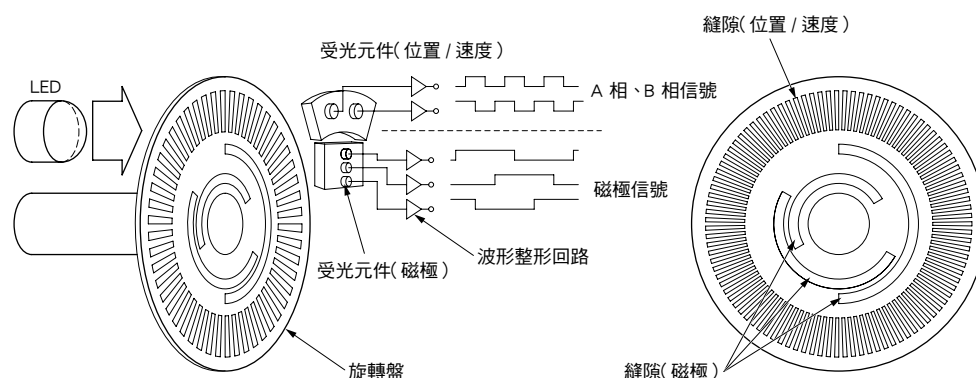


圖 2.15 編碼器結構

2.3.2 產生磁場的元件

使用感應馬達時，會經由轉子中感應的電流和定子中的旋轉磁場產生轉矩，但使用無刷馬達等同步馬達時，則經由永久磁鐵的磁場和定子中的旋轉磁場產生轉矩。接下來，我們將針對促成無刷馬達外型小巧、高輸出及高效率特徵的最主要部件永久磁鐵進行說明。

a. 鐵氧體燒結磁鐵

1930 年由日本人發明。因為主要成分是氧化鐵，所以具有成本效益。此外，由於不需要表面處理，因此性價比高，而且仍是全球產量和用量最大的磁鐵。

- 最大能積 (BH) 最大 8.0 至 43.8 kJ/m³ [1.0 至 5.5 MGOe]

b. 稀土燒結磁鐵

有釷鈷 (SmCo) 和釹 (NdFeB) 兩種類型，釹磁鐵具有最高性能，因此在小型節能馬達中扮演不可或缺的角色。然而，由於少有國家生產用於製造此磁鐵的稀土金屬，因此其產量很少、價格昂貴。

- 最大能積 (BH) 最大 199 至 414 kJ/m³ [25 至 52 MGOe]

c. 黏結磁鐵

這些磁鐵是透過將鐵氧體和稀土磁鐵的細磁粉與樹脂和其他黏合劑混合而成型和製造。因為此磁鐵可任意呈現多種形狀，所以在組裝與接合工作中具有優異的可加工性，但此磁鐵包含非磁性部分，因此其磁性是燒結磁鐵的一半或更小。

- 最大能積 (BH) 最大
 - 釹類型 63 至 159 kJ/m³ [8 至 20 MGOe]
 - 鐵氧體 5.6 至 17.5 kJ/m³ [0.7 至 2.2 MGOe]



永久磁鐵的發明史

無刷馬達的發展與永久磁鐵的發展密切相關。高性能磁鐵的發明使馬達變得小型化，高輸出化和高效率化。以下是現代永久磁鐵外觀和演變的時間順序表。

年	永久磁鐵和磁氣學的主要相關事件
1917	本多博士發明「KS 鋼」(日本)
1919	發現「巴克豪生效應」(德國)
1930	以比特 (Bitter) 技術解釋「磁疇構造和磁疇原理」
1930	加藤博士和武井博士發明世界上第一個「鐵氧體磁鐵和 OP 磁鐵」(日本)
1932	三島博士發明「MK 鋼」(日本)
1934	本多博士發明「NKS 鋼」(日本)
1936	開發出「鉑鈷 (Pt-Co) 磁鐵」(德國)
1938	開發出「鋁鎳鈷合金磁鐵」(美國)
1952	開發出「鋇鐵氧體磁鐵」(荷蘭)
1960	發明「錳鋁 (Mn-Al) 磁鐵」(荷蘭)
1961	開發出「鋇鐵氧體磁鐵」(美國)
1966	開發出「釷鈷 (SmCo5) 粉末磁鐵」(美國)
1969	開發出「釷鈷 (SmCo5) 燒結磁鐵」(美國)
1970	發明並工業化「錳鋁碳 (Mn-Al-C) 磁鐵」(日本)
1971	金子博士發明「鐵鉻鈷 (Fe-Cr-Co) 磁鐵」(日本)
1972 - 1974	工業化「釷鈷 (SmCo5) 燒結磁鐵和黏結磁鐵」(日本)
1976	「釷鈷 (Sm ₂ Co ₁₇ 型) 燒結磁鐵」可供實際使用 (日本)
1983	使用快速淬火法發明「釹 (Nd-Fe-B) 磁鐵」(美國)
1983	發明「釹 (Nd-Fe-B) 燒結磁鐵」(日本)

* 資料來源為 NeoMag Co., Ltd. 網站

3 無刷馬達驅動方式

無刷馬達使電流依照適當時間朝轉子磁極流過馬達線圈而旋轉。驅動方式(電流流動方式)與馬達特性之間有密切的關係，並且已經使用各種方法來改善馬達的可控性和特性。接下來，我們將說明典型的驅動方式和電流控制方法。

3.1 馬達驅動方式

3.1.1 矩形波驅動方式(120°導電模式)

有許多類型的無刷馬達驅動方式，120°導電模式的矩形波驅動是一個常見的範例。如圖 3.1 所示，此方法根據霍爾 IC 輸出信號組合切換激磁狀態。在低速運轉期間出現速度漣波時，透過簡單的電路可以達到高輸出，因此廣泛用於控制 OA 機器和功率裝置的無刷馬達。

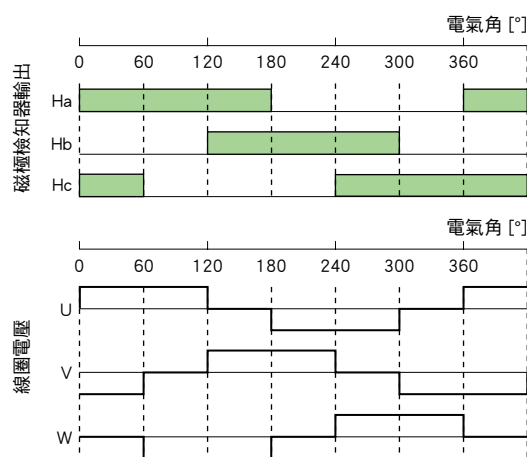


圖 3.1 矩形波驅動激磁模式

3.1.2 正弦波驅動方式

正弦波驅動方式是一種可對施加電壓進行精密控制的驅動方式，如圖 3.2 所示，使馬達電流呈正弦波狀。此驅動方式的轉矩波動小，因此能穩定的旋轉。此外，還能降低驅動馬達產生的噪聲。

但是，若要進行正弦波驅動，必須精確檢測轉子磁極位置。傳統上需要高解析度編碼器，但缺點是會造成馬達的總長度和成本增加。

近年來，不再使用編碼器，取而代之的是：

- 使用軟體處理霍爾 IC 信號。
- 使用馬達電感和反電動勢進行檢測。

因此，現在可以使用各種其他方法檢測磁極角位置並進行正弦波驅動。

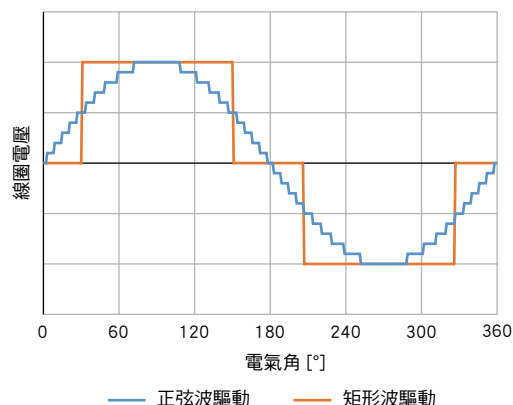


圖 3.2 正弦波驅動和矩形波驅動的施加電壓(單相)

3.1.3 每種驅動方式的電流波形

實際電流波形如圖 3.3 所示。相對於施加電壓波形，矩形波驅動失真，而且與矩形波相比，實際形狀更接近正弦波。正弦波驅動的波形類似施加電壓波形。

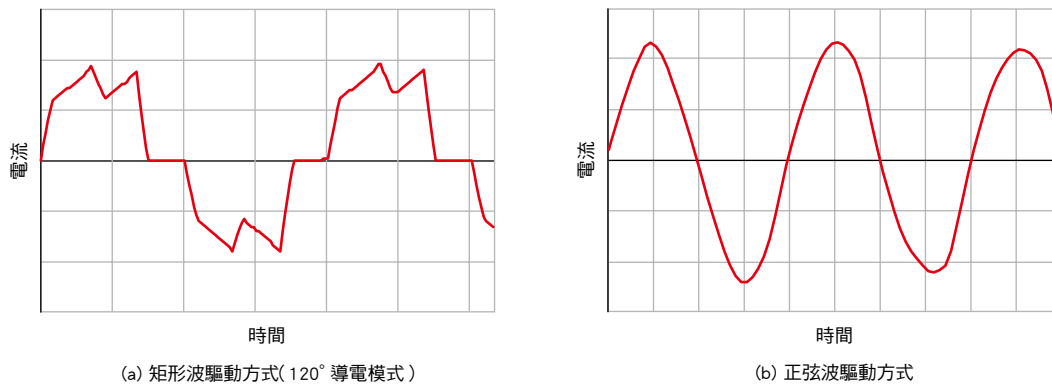


圖 3.3 電流波形

3.2 驅動方式和馬達轉矩

正弦波驅動方式的轉矩波動比矩形波驅動方式小，因此能平順的運轉。讓我們使用馬達轉矩的產生原理來考量其原因。理想的馬達驅動方法是根據圖 2.2 所示弗萊明左手定則，讓磁通量和線圈電流總是彼此正交的運轉方法。此驅動方法適用於所有馬達類型。在直流馬達中，這是透過機械換流進行。為了說明無刷馬達的轉矩產生原理，我們將使用圖 3.4 所示的簡化三相 2 極模型。

旋轉軸位於轉子 N 極和 S 極的中心，線圈則以旋轉軸為中心，圍繞轉子的磁鐵，以互相間隔 120° 的位置關係，分別在定子的 U 相、V 相和 W 相各設置一個線圈。

U+、V+ 和 W+ 連接到驅動回路，Uc、Vc 和 Wc 連接到同一點(COM)。接下來，我們將指定從驅動回路流向 COM 的方向為正向，從 COM 流向驅動回路的方向為負向。

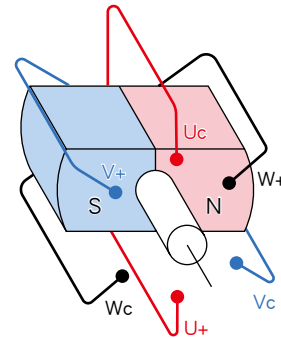


圖 3.4 簡化三相 2 極模型

讓我們仔細檢視特定相位的線圈。從圖 3.5 中的線圈和轉子磁鐵狀態可以看到，轉子和定子的位置與它們在直流馬達中的位置相反。如果電流如圖 3.5 所示流動，根據弗萊明左手定則，S 極側將產生向下的電磁力，N 極側將產生向上的電磁力。然而，因為無刷馬達中的線圈是固定的，所以轉子磁鐵上的反作用力會使轉子順時針轉動。

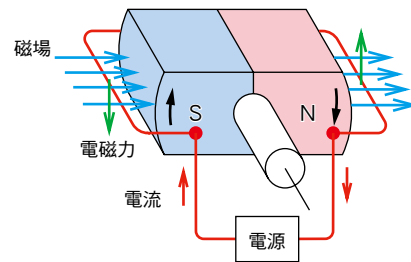


圖 3.5 產生最大轉矩的狀態

使用直流馬達旋轉原理部分中說明的以下公式，計算圖 3.5 所示狀態下作用在線圈上的電磁力 F [N]。

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

i : 電流 [A]

B : 磁通量密度 [T]

l : 橫穿磁場的導體長度 [m]

但是，如果轉子旋轉並處於圖 3.6 所示的狀態，在線圈向外側延伸的方向會產生作用於導體上的電磁力 F ，因此不會朝轉子磁鐵的旋轉方向產生作用力(轉矩)。

也就是說，相對於導體，作為轉矩的磁通量密度 B 方向會與旋轉軸正交，並且根據轉子磁鐵的旋轉角度而改變。

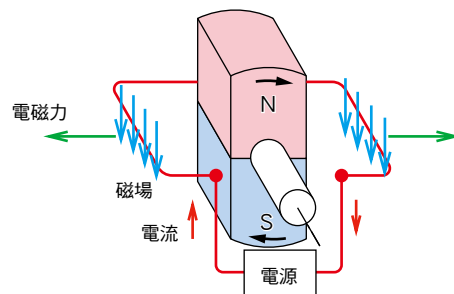


圖 3.6 不產生轉矩的狀態

轉子已旋轉時，假設彼此偏移 120° 的 U 相、V 相和 W 相線圈上作為轉矩的磁通量密度（以下稱為磁通量密度）變成正弦波狀。

以圖 3.4 所示的轉子角度從 0° 順時針旋轉且最大磁通量密度為 B_0 時，轉子角度與 B_u 、 B_v 和 B_w 所代表的相位磁通量密度之間的關係會以公式 (3.2) 表示。

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

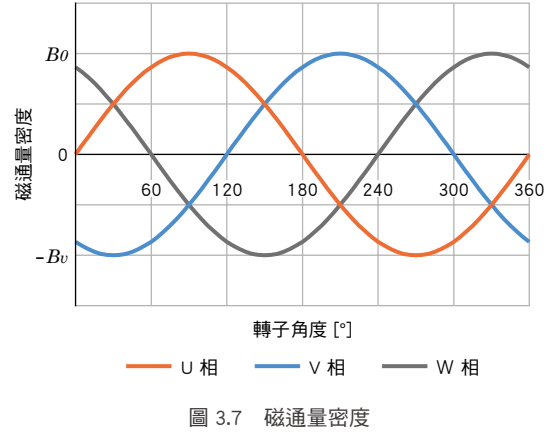


圖 3.7 磁通量密度

3.2.1 矩形波驅動方式

為了說明使用矩形波驅動時的馬達轉矩，我們將使用圖 3.4 所示的簡化三相 2 極模型。

a. 驅動電流

對於採用矩形波驅動方式的無刷馬達，如「2.2.2 無刷馬達旋轉原理」中所述，電流將根據磁極檢知器檢測到的轉子角度，按照激磁模式流向 U 相、V 相和 W 相線圈。

如果以圖 3.4 所示的轉子角度從 0° 順時針旋轉，且馬達電流為 i_m ，則轉子角度與各相位的相位電流之間的關係如圖 3.8 所示。

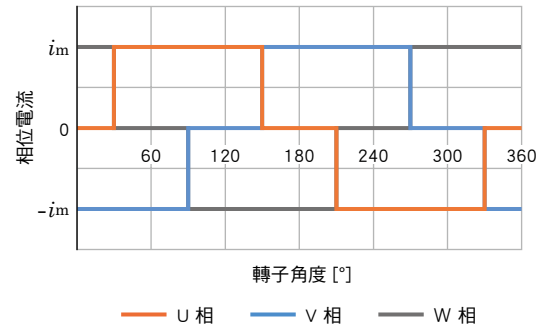


圖 3.8 矩形波驅動電流波形

在此點時，若轉子角度在 30° 到 150° 之間，流過 U 相的電流為 i_m ，若在 210° 到 330° 之間，則為 $-i_m$ 。相對於 U 相電流，V 相和 W 相的電流分別出現 120° 和 240° 的相位延遲。

b. 馬達轉矩

使用電磁力 F 和從轉子旋轉中心到導體的距離 r 來計算每個相位線圈產生的轉矩 T 。

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

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

因此，馬達轉矩是各相位線圈產生的轉矩總和，並由以下公式表示。

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

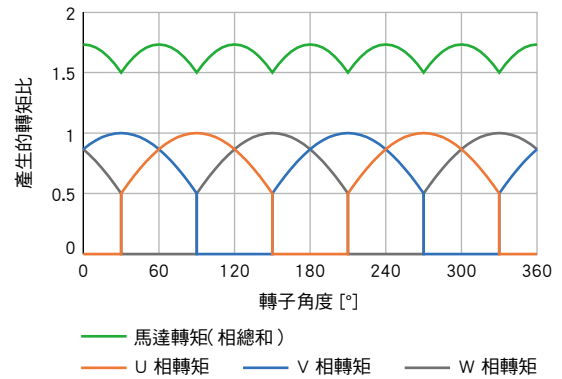


圖 3.9 矩形波驅動轉矩波形

如果 r 、 l 、 i_m 和 B_0 設為 1，並且使用公式 (3.2)、圖 3.8 和公式 (3.5) 從每個轉子角度的電流和磁通量密度計算各相位的轉矩，會產生圖 3.9 所示的轉矩波形。因為每次旋轉會產生 6 次轉矩波動，所以在低速旋轉期間會產生速度漣波。

3.2.2 正弦波驅動方式

為了說明使用正弦波驅動時的馬達轉矩，我們將使用圖 3.4 所示的簡化三相 2 極模型。

a. 驅動電流

轉子以順時針旋轉時，圖 3.10 所示相位差 120° 的正弦波電流會流向彼此偏移 120° 的 U 相、V 相和 W 相線圈。在圖 3.4 中，如果轉子角度從 0° 順時針旋轉，而且電流的最大值為 i_m ，則 i_u 、 i_v 和 i_w 所代表的各相位電流會以公式 (3.6) 表示。

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

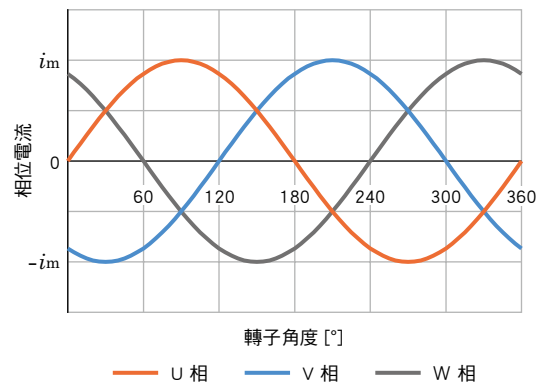


圖 3.10 正弦波驅動電流波形

b. 馬達轉矩

如同矩形波驅動一樣，馬達轉矩是各相位線圈產生的轉矩總和，並且使用公式 (3.5) 計算。

此外，可以使用公式 (3.2) 和公式 (3.6) 將公式 (3.5) 簡化如下。

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

如果公式 (3.7) 中的 r 、 l 、 i_m 和 B_0 設為 1，並且計算每個轉子角度相位的電流和磁通量密度總和，會產生圖 3.11 所示的轉矩波形。在公式 (3.7) 中，轉子角度 θ 消失，圖 3.11 中的馬達轉矩恆定。換句話說，正弦波驅動時，在每圈旋轉中都沒有轉矩波動，而且在低速旋轉期間能平順的運轉。

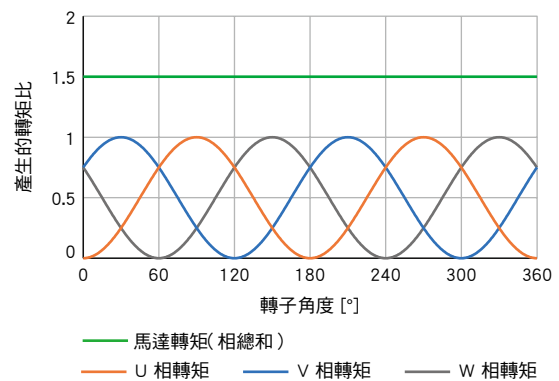


圖 3.11 正弦波驅動轉矩波形

3.3 電流控制方法

根據驅動方式而定，無刷馬達具有不同的電流控制方法。此外，若要控制轉速和產生的轉矩，需要控制馬達電流量。接下來，我們將說明控制馬達電流的方法。

作為向馬達線圈施加電壓的控制方法，我們採用了一種稱為 PWM(脈波寬度調製)的電子控制方式。PWM 控制是透過反覆接通和斷開電路中的開關元件並產生脈波形狀的電壓來控制輸出電壓的方法。

圖 3.12 顯示直流馬達的 PWM 控制電路模型。圖 3.13 顯示接通開關期間，脈波寬度變化(調製)時的電壓波形和電流波形。調製脈波寬度和改變接通 / 斷開開關元件的週期比來控制平均電壓。

在此點時，受電感的影響，電流一邊滯後於電壓一邊增加，當不再施加電壓時，電流會逐漸變小。

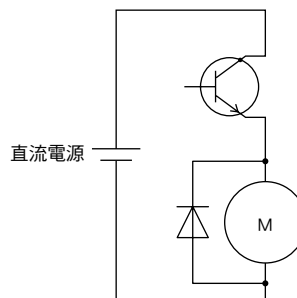


圖 3.12 PWM 回路

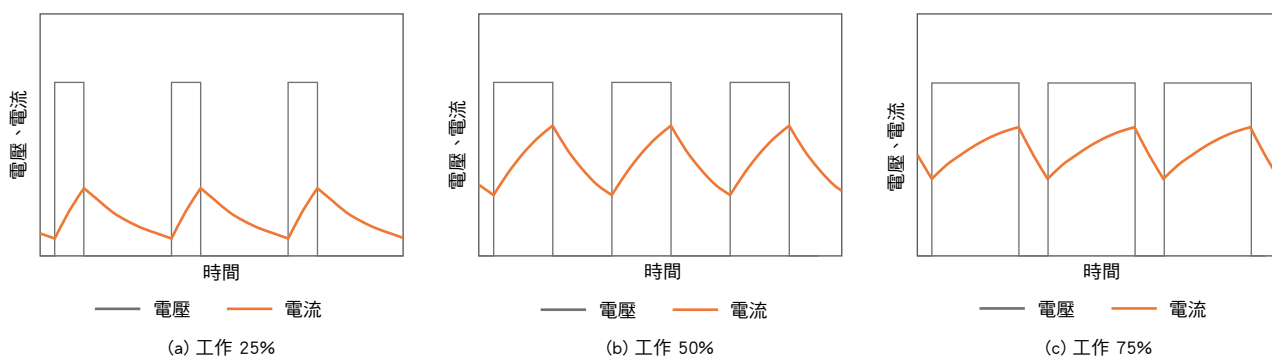


圖 3.13 電壓週期和電流波形

3.3.1 調製方法

接下來說明如圖 3.13 所示 PWM 控制的調製方法。PWM 控制週期比透過比較標準三角波信號和標準電壓來決定，如果三角波信號電壓低於標準電壓將接通開關元件，如果高於標準電壓則斷開。若要增加馬達電流，需要增加標準電壓。這表示開關元件週期比變大，而且由於平均電壓增加，馬達電流也會增加。如果標準電壓降低，開關元件週期比會變小，而且由於平均電壓減少，馬達電流也會減少。

採用矩形波驅動方式的無刷馬達透過對馬達線圈激磁的開關元件進行 PWM 控制來調整馬達電流，並控制轉速和產生的轉矩。

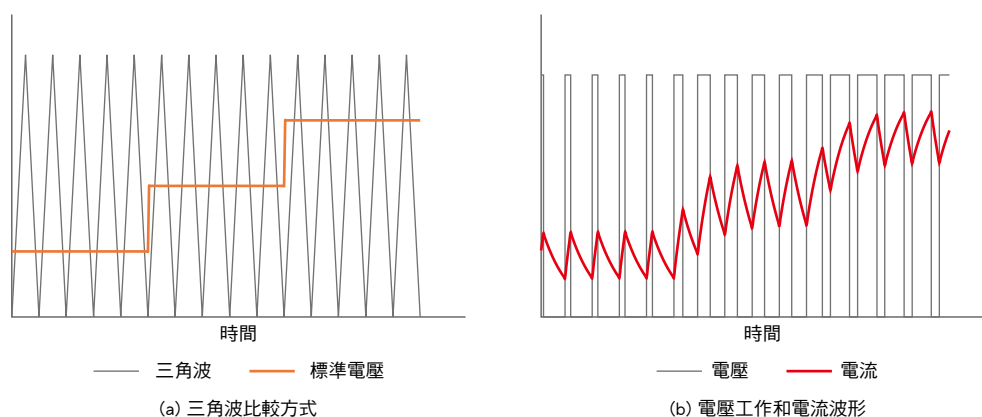


圖 3.14 標準電壓和電流

3.3.2 正弦波驅動方式調製方法

接下來說明如圖 3.10 所示正弦波驅動方式的調製方法。如果標準電壓呈正弦波狀，則開關元件週期比會不斷調製，可以形成正弦波狀電流的流動。換句話說，透過 PWM 控制，標準電壓波形和電流波形呈現相同的形式。(希望輸出波形的標準電壓稱為調製信號。)採用正弦波驅動方式的無刷馬達進行 PWM 控制的方法與矩形波驅動方式相同，但標準電壓建立方法不同。

公式 (3.6) 中的正弦波馬達電流是電流最大值 i_m 和轉子角度 θ 的函數。也就是說，根據轉子角度資訊和電流指令值產生調製信號，調整流向馬達線圈的電流，並且控制轉速和產生的轉矩。

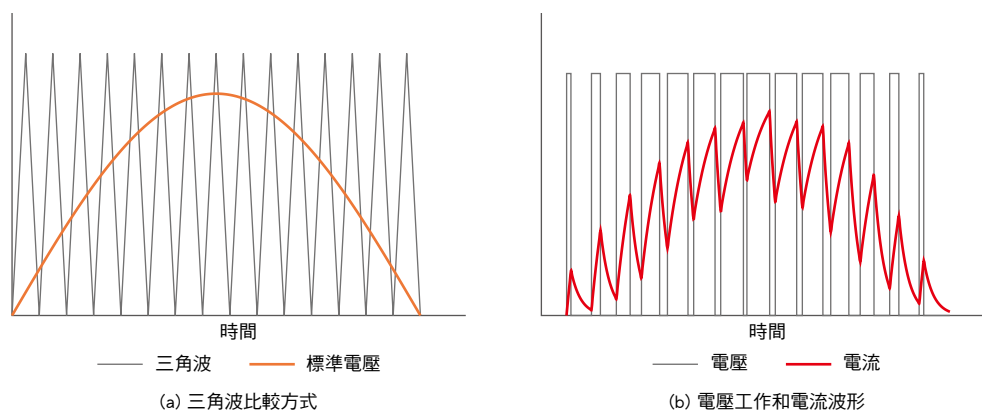


圖 3.15 正弦波 PWM 驅動

因此，若要在無刷馬達中進行正弦波驅動，必須精確檢測轉子磁鐵角度。

4 無刷馬達的控制原理

無刷馬達可透過結合驅動回路來操作。若要以指令的轉速操作馬達，需要控制速度的系統。接下來，我們將說明驅動回路配置和控制無刷馬達速度的方法。

4.1 基本驅動回路配置和角色

無刷馬達驅動回路的基本配置如圖 4.1 中虛線內的範圍所示。可以根據功能將配置分為 6 個區塊。

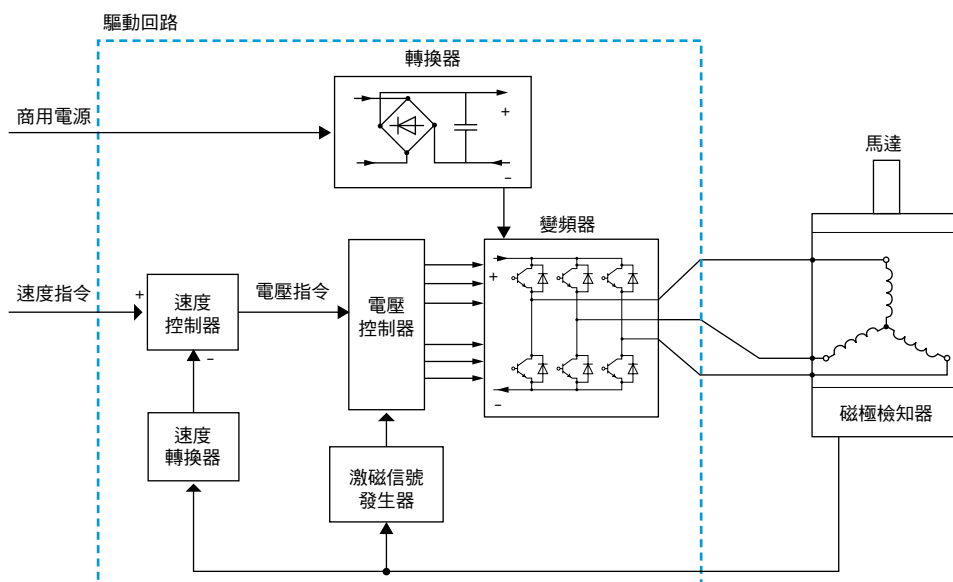


圖 4.1 基本驅動回路配置

4.1.1 轉換器

轉換器對商用電源的交流電壓進行整流，並以電容器使其變平滑，將其轉換為直流電壓。直流電壓供應給變頻器，用於驅動馬達。

直流電源輸入的無刷馬達沒有轉換器。直流電源直接供應直流電壓給變頻器。

4.1.2 速度控制器

速度控制器比較速度指令和從速度轉換器輸出的馬達速度（反饋速度），然後發出電壓指令以確保馬達轉速遵循速度指令。

運用速度指令和速度反饋資訊的控制系統稱為速度迴路。

4.1.3 速度轉換器

速度轉換器將霍爾 IC 輸出頻率轉換為速度反饋，並將其輸出到速度控制器。

三相無刷馬達中有 3 個霍爾 IC，每對南北磁極輸出 3 個脈波信號。檢測脈波信號的上升緣和下降緣，可以獲得 6 個信號。

4.1.4 激磁信號發生器

激磁信號發生器向電壓控制器指示電流流過變頻器 6 個開關元件中的哪個元件。

如圖 4.1 所示，透過馬達內配置的霍爾 IC (Ha、Hb 和 Hc) 輸出信號組合來檢測轉子磁極位置。激磁信號發生器向電壓控制器指示根據旋轉方向指令產生轉矩的線圈所連接的開關元件。

4.1.5 電壓控制器

電壓控制器輸出信號，以便把速度控制器的指令電壓施加到激磁信號發生器所指定的變頻器開關元件上。

4.1.6 變頻器

變頻器根據電壓控制器的指令對馬達線圈進行 PWM 控制。



如何計算轉速

如果轉子中的極數為 n ，且脈波信號的週期為 Δt ，則根據公式 (4.1) 計算馬達轉速 N 。

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

N : 馬達轉速 [r/min]

Δt : 脈波週期 [s]

4.2 速度控制方法

為了說明控制無刷馬達速度的方法，我們以從馬達處於停止狀態開始直到達到指示速度的過程為例。

1. 將速度指令輸入到速度控制器。
2. 速度控制器比較速度指令和反饋速度。
3. 因為反饋速度低於速度指令，所以速度控制器向電壓控制器輸出高電壓指令。
4. 變頻器由來自電壓控制器的信號控制，並將指示電壓施加到馬達。
5. 馬達開始旋轉並加速。
6. 當馬達反饋速度接近速度指令時，來自速度控制器的電壓指令減小。
7. 馬達轉矩減小，加速度逐漸減慢。
8. 反饋速度和速度指令之間的差距變得更小，來自速度控制器的電壓指令減小。
9. 馬達轉矩低於負載轉矩，馬達減速。
10. 反饋速度和速度指令之間的差距變大，來自速度控制器的電壓指令增加。
11. 馬達加速。

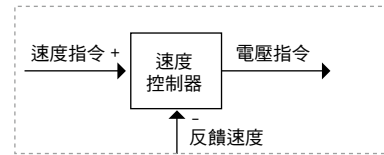


圖 4.2 速度控制器

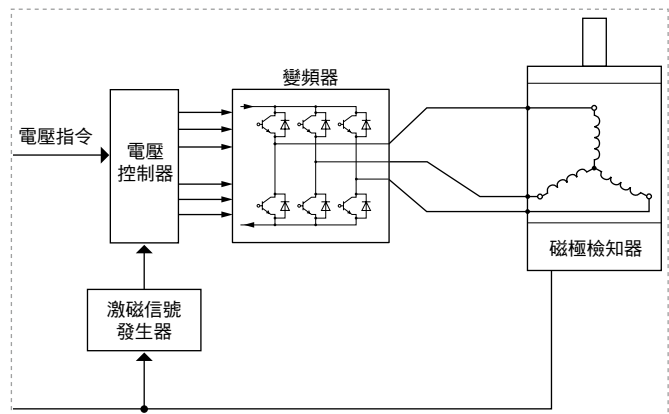


圖 4.3 電壓控制器

如上所述，可透過反覆加速和減速使馬達轉速遵循速度指令，進行速度控制。

4.3 高精度驅動回路配置和角色

我們現在將說明由驅動回路進行的高精度控制，例如以正弦波驅動增加馬達響應性和使產生的轉矩變平滑。除了圖 4.1 所示的基本驅動回路以外，還採用電流迴路，以便對馬達電流進行精密控制。此外，為了進行正弦波驅動，將激磁信號發生器更換成轉子磁極位置計算器。接下來，我們將說明在基本驅動回路中新增和變更的區塊。

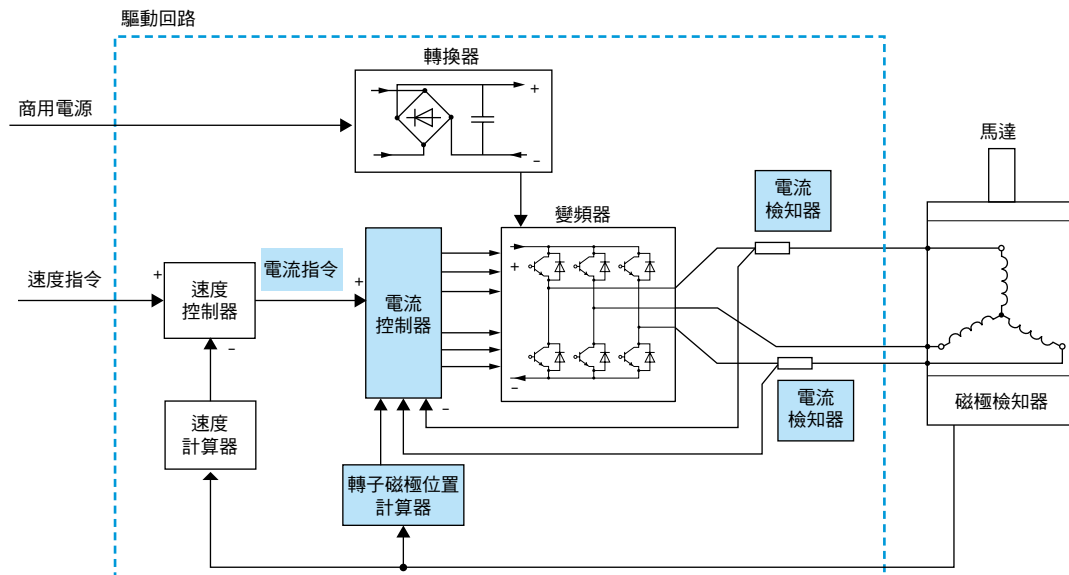


圖 4.4 高精度驅動回路配置

4.3.1 電流檢知器

電流檢知器檢測流過馬達線圈的電流，並向電流控制器提供反饋。因為輸入到馬達的電流總和與從馬達輸出的電流總和相等，所以在三相馬達中，可以透過檢測 2 相中的電流來估算 3 相中的電流。

因為無刷馬達產生的轉矩與馬達電流成正比，所以可以透過檢測馬達電流來估算馬達產生的轉矩。

4.3.2 轉子磁極位置計算器

轉子磁極位置計算器使用獨自研發的演算法根據霍爾 IC 的信號持續計算轉子位置。轉子位置的連續計算促成正弦波驅動，使轉矩波動較小，並且能平順的運轉。

4.3.3 電流控制器

電流控制器執行正弦波驅動的激磁信號控制。此外，它還執行比較速度控制器的電流指令和電流檢知器的馬達電流之操作，並控制馬達電流。在控制回路中加入電流迴路，可透過瞬間調整馬達電流來減小與電流指令的偏差。

4.4 轉矩控制方法

無刷馬達轉矩與馬達電流成正比。如「2.2.3 無刷馬達特性」中所述，限制馬達電流的最大值會使產生的轉矩恆定。

將高精度驅動電路中的電流指令最大值設為 I_1 、 I_2 和 I_3 ，執行使馬達電流等於設定值的反饋控制，馬達的最大轉矩會變成 T_1 、 T_2 和 T_3 ，如圖 4.5 所示。

換句話說，限制驅動回路中的馬達電流最大值可限制馬達中產生的轉矩。此功能稱為轉矩限制功能，它能以指定轉矩值推動物體，同時避免損壞減速機和裝置。

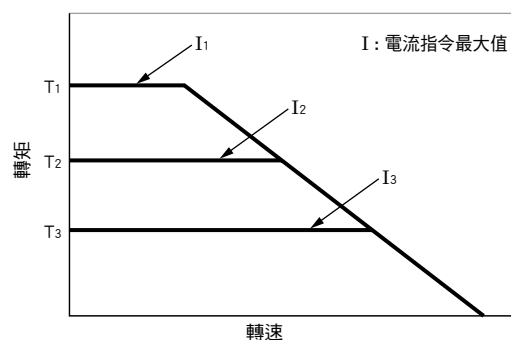


圖 4.5 轉速 - 轉矩特性 (限制電流)

4.5 剎車 (再生運轉)

若要将馬達減速並停止，只需切斷馬達電源即可，但由於為自然停止，因此停止時間很長。我們現在將說明縮短停止時間的剎車方法。

無刷馬達在轉子中使用永久磁鐵。如果馬達速度比速度指令慢，它們將作為馬達 (電力運轉) 並產生驅動轉矩，但如果馬達速度比速度指令快，它們將作為發電機並產生剎車轉矩。

由馬達產生的電力稱為再生電力，產生再生電力的運轉狀態稱為再生運轉。再生運轉期間的馬達剎車轉矩與電流值成正比，再生電力由剎車轉矩和馬達轉速的乘積決定。

啟動和停止期間的馬達速度如圖 4.6 所示。產生再生電力的典型馬達運轉範例包括以下：

- 執行負載上下驅動時的下降運轉期間 (捲下運轉時)
- 慣性負載加速到特定速度後過衝時 (圖 4.6 ①)
- 慣性負載減速停止運轉期間 (圖 4.6 ②)

特別是，由於過衝期間 (圖 4.6 ①) 和開始減速時 (圖 4.6 ② 開始時) 轉速很高，因此會產生大量的再生能量。

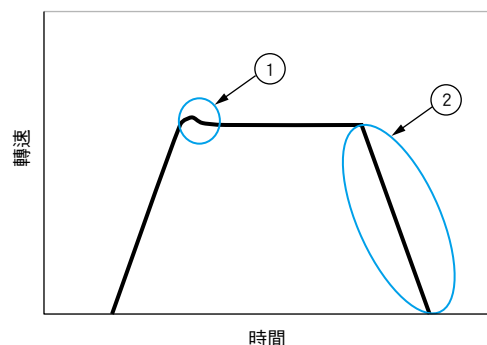


圖 4.6 運轉期間產生再生電力的位置

剎車運轉期間的電流由圖 4.7 和圖 4.8 中的紅色箭頭指示。在剎車運轉期間，電流會產生與電力運轉期間產生的轉矩方向相反的轉矩。此電流方向與發電期間由反電動勢產生的電流方向相同。

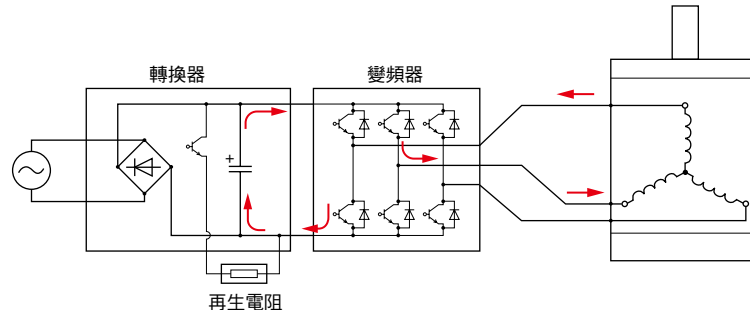


圖 4.7 電晶體開啟

通過接通和關閉變頻器中的電晶體來控制剎車轉矩。電晶體關閉時，驅動器施加的電壓消失，但產生反電動勢。由於這些電壓而流動的電流通過二極體回到驅動器中的轉換器部分，如圖 4.8 所示，但由於有二極體電橋而無法返回電源，因此儲存在平滑電容器中。

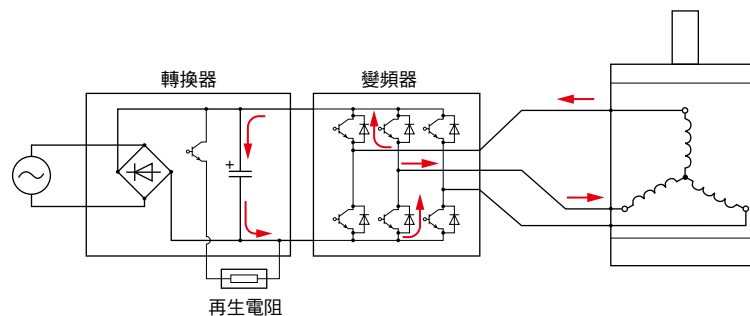


圖 4.8 電晶體關閉

使用以下公式計算儲存在電容器中的能量 E 。

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

E : 能量 [J]

C : 轉換器部平滑電容器容量 [F]

V : 電容器端子之間的電壓 [V]

驅動回路電源部分的電容器容量 C 為固定值。進行再生運轉時，部分再生能量儲存在電容器中。因此會根據儲存的能量在電容器端子之間出現電壓。

剎車運轉期間的慣性負載大或上下驅動期間的負載大時，平滑電容器端子之間的電壓會升高，可能導致驅動回路元件損壞。為了避免損壞驅動回路，可透過電阻將再生能量轉換成熱能，或使用電源再生裝置將其返回商用電源。對於幾百瓦的小型馬達，典型方法是使用再生電阻。平滑電容器端子之間的電壓超過設定的電壓時，電流會流過再生電阻，再生能量將轉換成熱能以被消耗。

5 無刷馬達中使用的技術

無刷馬達作為可調速馬達，具有優越的特性。
在本節中，我們將說明實現這些馬達效能的技術。

5.1 廣泛的速度控制範圍(低速運轉)

我們現在將說明讓無刷馬達能在低速下平穩運轉的技術。

5.1.1 低頓轉設計

馬達軸處於非通電狀態時，用手指旋轉馬達軸時感覺到的脈動轉矩稱為頓轉轉矩。無刷馬達在其轉子中使用永久磁鐵，轉子及其面對的定子齒之間氣隙中儲存的磁氣能量根據轉子旋轉位置而變化。轉子和定子齒的相對角度反覆使磁氣能量出現平衡和失衡，從而產生頓轉轉矩。特別是，如果使用具有高能積的磁鐵，則高磁氣能量也會產生高頓轉轉矩。

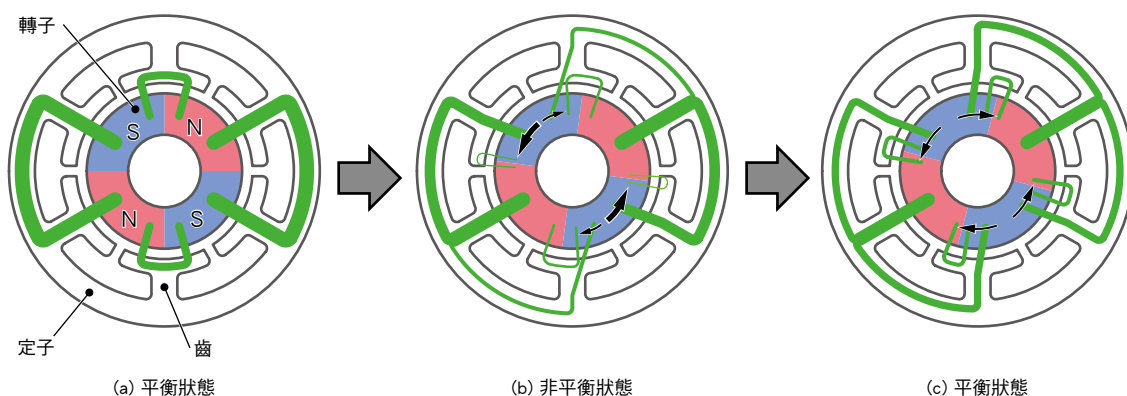


圖 5.1 磁氣能量狀態

我們現在將以圖 5.1 所示的 4 極 6 槽馬達為例，說明轉子角度和磁氣能量狀態。在轉子磁鐵中產生的磁通量沿綠線指示的路徑通過定子鐵芯，從 N 極流向 S 極。線的粗細度反映磁通量，線朝中心的曲率反映磁氣能量的不平衡狀態。此時，在轉子朝磁通量嘗試流動的方向(由黑色箭頭表示)會產生力量，使其變直。

在圖 5.1 (a) 所示的狀態下，所有磁通量都朝向中心，而且每個槽的磁氣能量都很均衡。在圖 5.1 (b) 所示的狀態下，轉子順時針旋轉 7.5°，朝向 S 極的齒之間的磁氣能量失衡，產生方向和大小與黑色箭頭一致的轉矩。轉矩方向相反，但逆時針方向產生的轉矩更大，因此會產生逆時針方向的轉矩。在圖 5.1 (c) 所示的狀態下，轉子再次順時針旋轉 7.5°，朝向 S 極的齒之間的磁氣能量失衡，產生方向如黑色箭頭所示的轉矩。在此狀態下產生的轉矩會被朝反方向行進的等量轉矩抵消，不會產生頓轉轉矩。

馬達運轉時也會產生頓轉轉矩。馬達運轉時，頓轉轉矩會使負載轉矩發生變化並阻礙平順的運轉，因此在磁氣設計期間，必須盡量縮小頓轉轉矩。到目前為止，已經對減少頓轉轉矩的方法進行大量研究。主要方法如下。

- 將適當的齒數與適當的磁極數組合
- 使轉子磁鐵排列或磁鐵磁化傾斜(轉子斜槽)
- 層壓定子使其扭曲(定子斜槽)
- 優化磁鐵和定子的形狀
- 優化磁鐵磁化的波形

將適當的齒數與適當的磁極數組合是最有效的頓轉轉矩抵消方法。通常，馬達每旋轉 1 圈的頓轉轉矩週期是磁極數和齒數的最小公倍數。此外，最小公倍數越大，頓轉轉矩越小。

圖 5.2 顯示 8 極 12 槽馬達和 10 極 12 槽馬達的頓轉轉矩比較。8 極 12 槽馬達每旋轉 1 圈的頓轉轉矩週期數是 24，10 極 12 槽馬達則為 60。10 極 12 槽馬達產生的週期比較短，而且頓轉轉矩的幅度明顯減小。東方馬達的無刷馬達為 10 極 12 槽型。

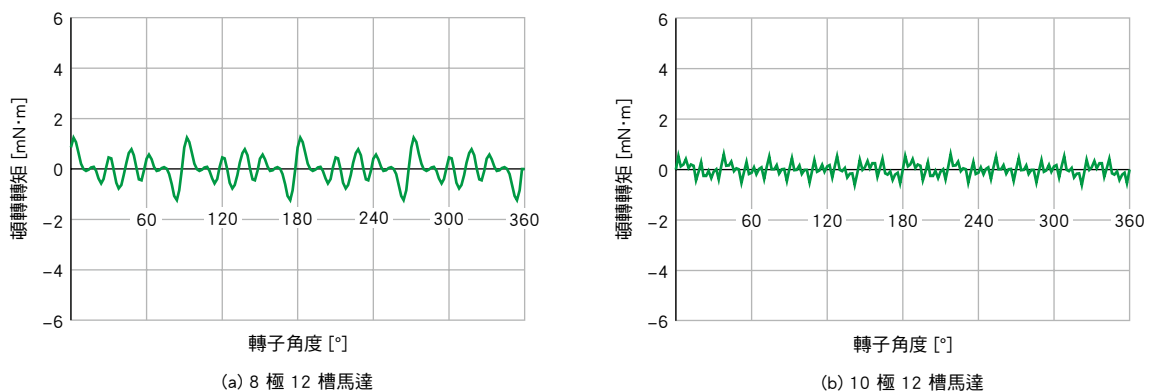


圖 5.2 頓轉轉矩

5.1.2 正弦波驅動

運用正弦波驅動減小轉矩波動的大小，即使在低速旋轉期間也能平順的運轉。原理如「3.2.2 正弦波驅動方式」所述，在此我們將說明構成此原理關鍵的先決條件。

a. 作用於線圈上的磁通量密度

作用於線圈上的磁通量密度應變更，使其成為真正的正弦波狀曲線，如公式 (3.2) 所示。如果正弦波發生失真，馬達會產生轉矩波動，造成速度漣波。產生理想磁通量密度波形的的方法與減小頓轉轉矩的方法相同，包括以下方法。

- 齒數和磁極數的最佳組合
- 應用轉子斜槽或定子斜槽
- 優化磁鐵和定子的形狀
- 優化磁鐵磁化的波形

然而，因為減小頓轉轉矩的形狀與允許取得最佳磁通量分佈的形狀不同，所以磁路的設計需考慮平衡。

b. 由正弦波組成的馬達電流

如公式 (3.6) 所示，流過馬達的電流最好由正弦波組成。如同磁通量密度一樣，如果發生失真，會產生轉矩波動，造成速度漣波。為了產生理想電流波形，必須對轉子磁極位置進行精細且精確的檢測。在東方馬達，使用軟體間歇處理霍爾 IC 信號讓我們能夠獲得高解析度的轉子磁極位置資訊。

5.1.3 速度檢測精度

無刷馬達使用速度計算器將來自霍爾 IC 的信號轉換為轉速，並取得有關馬達速度的資訊。馬達的低速運轉加大霍爾 IC 的信號檢測間隔，如圖 5.4 所示，而且馬達速度檢測值會定期變更。如果反饋速度檢測值中有漣波，則來自速度控制器的電壓(電流)指令中將出現漣波，導致馬達出現速度漣波。

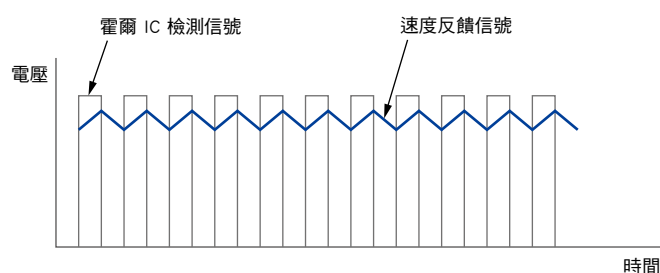


圖 5.3 馬達速度快

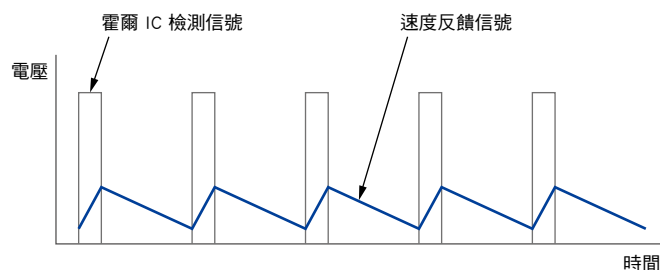


圖 5.4 馬達速度慢

東方馬達的無刷馬達將轉子中的磁極數從 4 增加到 10，使霍爾 IC 信號頻率增為 2.5 倍。這使低速運轉期間的反饋信號平穩，減少馬達速度漣波。

由於無刷馬達使用磁極檢測用檢知器，因此不適合低速運轉。然而，磁氣分析技術、軟體信號處理技術及驅動技術的改進使 4 極馬達的傳統最低速度 300 r/min 得以降至 80 r/min。此外，即使在低速時輸出轉矩也是恆定的，因此可以在低速到高速的各種速度下進行控制。

5.2 廣泛的速度控制範圍(高速運轉)

霍爾 IC 信號波形和馬達電流波形如圖 5.5 所示。

與 500 r/min 相比，相對於霍爾 IC 信號，可以在 1000 r/min 觀察到電流波形的滯後和馬達電流的增加。

執行無刷馬達的驅動時，根據霍爾 IC 信號和激磁模式施加電壓到線圈。然而，如果轉速增加，會因為馬達電感而在電流相位中發生滯後。在電流相位中發生的滯後會對馬達的轉矩產生無效電磁力，從而降低有效電磁力。因為馬達執行控制以保持轉速，所以電流會增加，並且產生所需的轉矩。此外，如果速度加快，相位滯後會增加，旋轉也可能停止。

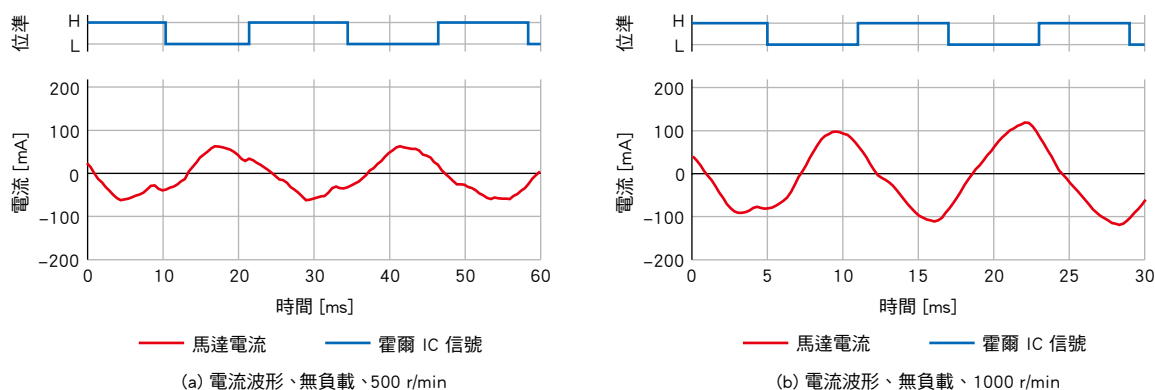


圖 5.5 電流相位滯後

我們現在將說明用於校正電流相位滯後的方法，這是高速運轉的必要條件。

5.2.1 利用相位控制進行輸出轉矩校正

超前角控制可根據馬達速度計算電流相位滯後並將電壓相位超前來校正輸出轉矩。電壓相位超前值稱為超前角 α ，可以使用以下公式計算。

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

α : 超前角 [rad]

ω : 馬達電流角速度 [rad/s]

R : 線圈電阻 [Ω]

L : 電感線圈 [H]

K_e : 反電動勢常數 [V·s/rad]

E_m : 驅動器產生的電壓 [V]

然而，執行這種複雜的計算需要具有高處理能力的 CPU。因此在計算中使用超前角的近似公式，而不是直接套用公式來計算。

超前角和轉速之間的關係如圖 5.6 所示。在超前角大的區域中，由於其相對於轉速幾乎呈線性變化，因此可以使用線性近似公式來表示超前角和轉速之間的關係。同理，超前角和施加電壓之間的關係也能以線性近似表示，因此可以根據轉速和施加電壓計算超前角。然而，僅使用線性近似會使低速高負載運轉期間的相位過度超前，導致效率和轉矩減小，所以實際上需要對超前角值有所限制。

此控制方式的優點在於，由於不需要電流迴路，因此此電路配置簡單，而且馬達控制調整元件很少。

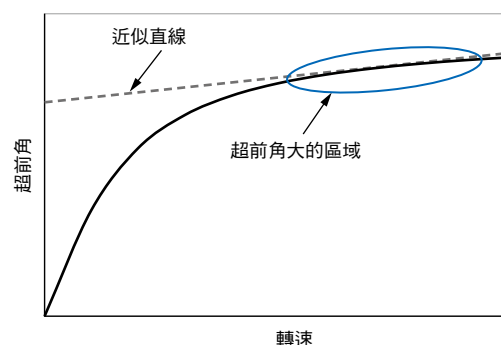


圖 5.6 轉速和最佳超前角之間的關係

5.2.2 向量控制

向量控制為一種控制方法，利用數學技巧將流過三相馬達線圈的電流轉換成相當於直流馬達的模型，進而簡化控制。

流過無刷馬達 U、V 及 W 相的電流會因為馬達轉矩及轉子旋轉角度而不斷變化。在這些情況下，很難進行電流控制的運算處理。然而，藉由將三相電流轉換成 2 相電流，並將固定坐標轉換為旋轉坐標，可以將電流分成產生轉矩的成分 (q 軸電流) 以及產生磁通量的成分 (d 軸電流)，不受轉子旋轉角度的影響。

在此狀態下，藉由建構一個電流迴路，使產生轉矩的 q 軸電流檢測值和產生磁通量的 d 軸電流檢測值追隨指令值，即可隨意控制輸出轉矩及通過線圈的磁通量 (交鏈磁通)。

由於可分別控制輸出轉矩及交鏈磁通，故能以高響應性控制輸出轉矩及速度。此外，藉由控制交鏈磁通，可達到最大效率控制，以利節能操作。通過進行最大轉矩控制及弱磁場控制等，可改善速度－轉矩特性。

經由向量控制改善電流波形的範例如圖 5.7 所示。圖 5.7 (a) 顯示沒有向量控制時的電流波形，圖 5.7 (b) 則為有向量控制的情況。在驅動回路中，控制馬達電流使其在霍爾 IC 輸出信號的上升緣時，從負切換為正。若沒有向量控制，會在馬達電流中觀察到滯後。在圖 5.7 (b) 中，霍爾 IC 信號的上升緣與電流切換一致，且電流的相位滯後消失。此外，進行向量控制可使馬達電流值更小。

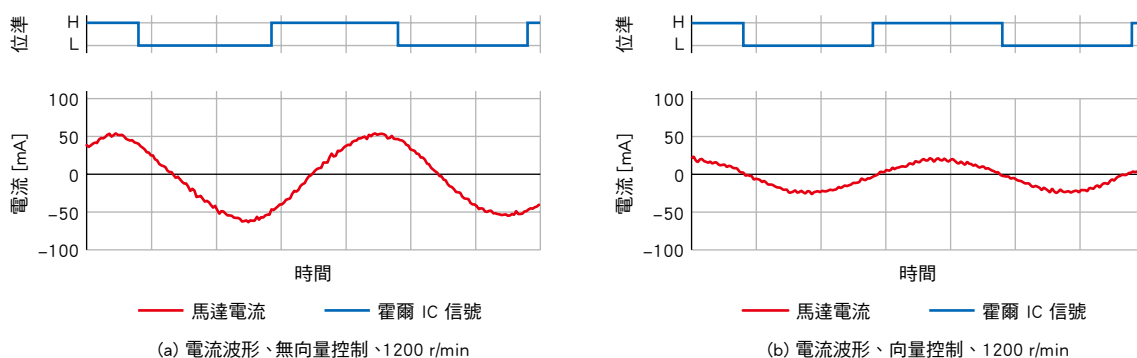


圖 5.7 向量控制期間的電流波形

使用旋轉坐標將圖 5.7 所示有向量控制和無向量控制的狀態顯示為電流向量，會產生如圖 5.8 所示的圖形。(逆時針旋轉時)

未執行向量控制時，電流向量相對於磁通量相位的方向(由紅色虛線表示)小於 90° 。除了用作轉矩的有效電流(q 軸電流)成分以外，馬達電流還包括不用作轉矩的無效電流成分。

執行向量控制時，電流朝與磁通量成 90° 的方向流動。運用向量控制使磁通量和電流方向保持 90° ，可消除高速運轉期間的電流相位滯後和無效電流，因此能高效運轉。

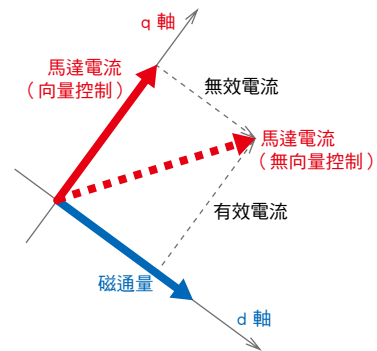


圖 5.8 電流相位



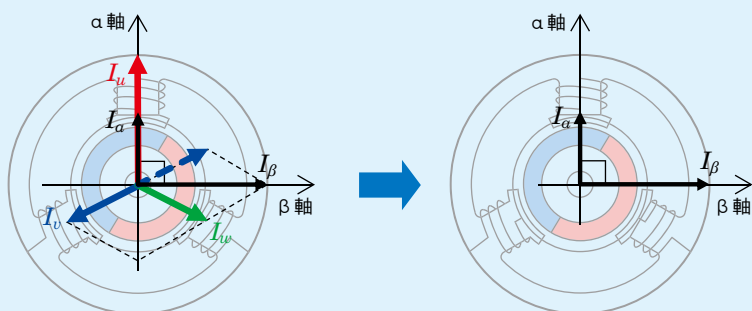
向量控制原理

1. 檢測馬達電流值 I_u 、 I_v 和 I_w
2. 將三相電流值轉換成正交的 2 軸 2 相電流值 [Clarke 轉換]

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

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

I_α 和 I_β 值隨各個轉子角度改變。

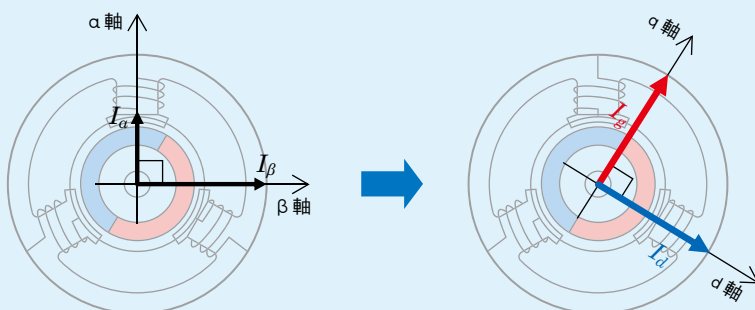


3. 把 2 相電流值的坐標系統從固定坐標轉換為與轉子同步旋轉的旋轉坐標 [Park 轉換]。
透過轉換坐標系統，將 d 軸方向固定為磁場方向，電流可視為直流，如同具有旋轉導體的直流馬達一樣，使計算更加簡單。

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

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

I_d 和 I_q 值為與轉子角度 θ 無關的常數。



4. 將實際 I_d (d 軸電流)和 I_q (q 軸電流)與指令值比較，找出差值。
5. 控制電流迴路的施加電壓，使電流指令值符合 I_d 和 I_q 。

5.2.3 弱磁場控制

弱磁場控制是指控制 d 軸電流來減弱產生磁通量的部分(磁場)的磁通量，從而在高速旋轉期間增加馬達產生的轉矩。

無刷馬達的基本特性是垂下特性，如圖 5.9 所示。馬達產生的轉矩與馬達電流成正比，因此速度越快，電流值越小。接下來，我們將解釋其原因。

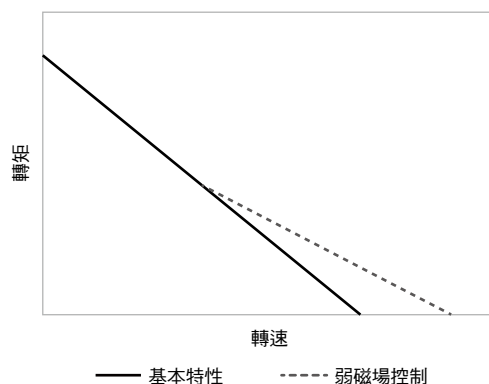


圖 5.9 轉速 - 轉矩特性

無刷馬達旋轉時，各區域的電壓由以下公式表示。

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

V : 電源電壓 [V]

R : 線圈電阻 [Ω]

i : 馬達電流 [A]

L : 電感線圈 [H]

di/dt : 電流變化率

K_e : 反電動勢常數 [V·s/rad]

$d\theta/dt$: 轉子角速度 [rad/s]

公式 (5.2) 的左側表示施加電壓，右側第一項是施加到線圈電阻的電壓，第二項是電感成分產生的電壓，第三項是反電動勢。

從公式 (5.2) :

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

如公式 (5.3) 所示，如果馬達轉速增加，電感成分會使電壓降增加、感應電壓上升，從而減小馬達電流。因此，無刷馬達的速度 - 轉矩特性為如圖 5.9 所示的垂下特性。

透過在高速旋轉期間進行弱磁場控制，使電流朝 d 軸負方向流動來減弱磁場的磁通量，可以降低線圈中產生的反電動勢。因為反電動勢減小時馬達的電流會變大，所以產生的轉矩會增加。這樣可擴大高速運轉期間使用的速度範圍(圖 5.9)。

5.3 高精度速度控制

5.3.1 速度變動率

速度變動率為調速馬達的重要規格之一。

速度變動率為當馬達以設定速度運轉時，若負載轉矩、電源電壓、環境溫度或使用環境中其他因素發生變化時，所出現的速度的變化率。東方馬達 (Oriental Motor) 使用在額定轉速下當以下條件發生變化時的速度變化率作為規格。因此，若額定轉速為 3000 r/min 且速度變動率為 $\pm 0.2\%$ ，則速度變化為 ± 6 r/min。

由於速度變動範圍取決於檢知器的檢測精度，故即使運轉速度並非 3000 r/min，速度變化量仍將接近 ± 6 r/min。

- 對負載：以無負載狀態為標準，施加額定負載時
- 對電壓：以額定電壓為標準，電壓在容許電壓範圍內變化時
- 對溫度：以環境溫度 25°C 為標準，溫度在使用環境溫度範圍內變化時

無刷馬達依據從霍爾 IC 信號計算的反饋速度，以閉迴路控制馬達速度。霍爾 IC 的信號量因為轉子的多極化而增加，從而提高了轉速的檢測精度，減小速度變動率，並允許以接近指令速度的速度運轉。

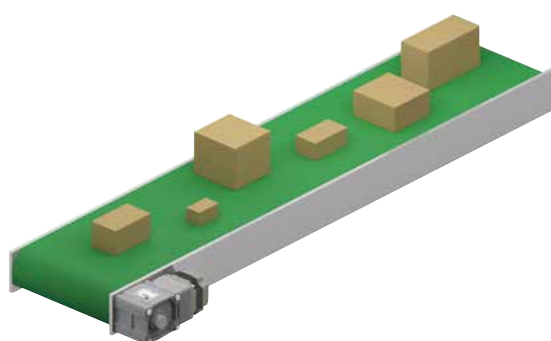
若是沒有速度檢知器的變頻器在執行無檢知器速度控制時，馬達轉速會因為負載轉矩的變動而變化。

表 5.1 對負載速度變動率

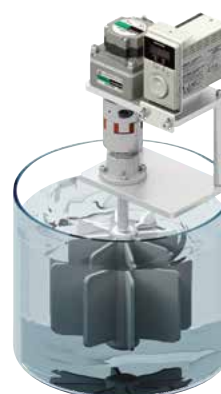
類型	系列	對負載變動率
無刷馬達	BXII 系列	$\pm 0.05\%$
	BLE2 系列	$\pm 0.2\%^*$
	BMU 系列	$\pm 0.2\%$
AC 調速馬達	DSC 系列	$\pm 1\%$ (參考值)
變頻器	組合馬達 KIIS 系列	-0.8% (向量控制參考值)

*使用數位設定時

由於速度變動率較小，即便使用在負載和重量會出現變動的傳送帶、液體黏性發生變化的攪拌裝置或排氣泵等，也能穩定運轉。此外，還適用於塗層、加熱及傳送期間需要固定處理時間的其他應用。



(a) 輸送帶



(b) 攪拌裝置

圖 5.10 應用範例



速度變動率和顫振特性之間的差異

除了速度變動率以外，顫振特性是另一個展現馬達速度穩定性的特性。

- 速度變動率：使用環境改變時產生的平均速度變動率
- 顫振特性：恆定速度旋轉期間平均速度的速度漣波比

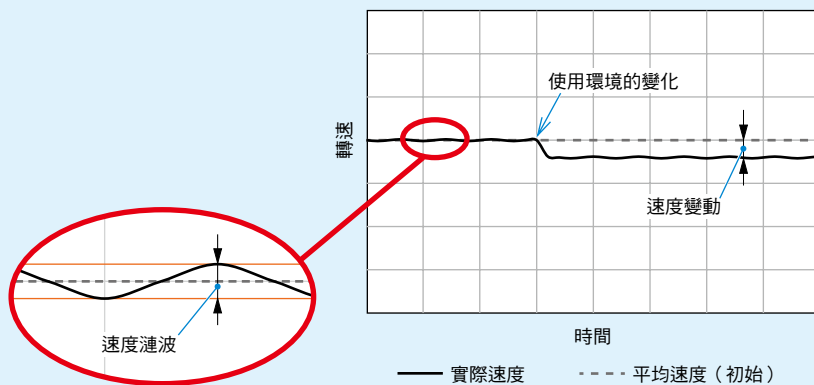


圖 5.11 馬達速度波形

速度變動是指馬達本身的平均變動速度，而速度漣波是指平均速度恆定時的實際速度變化幅度。

速度漣波透過馬達旋轉 1 圈的轉矩漣波或透過執行速度控制而產生。速度漣波會導致在影像檢查設備上畫面出現抖動，在塗佈設備上塗抹不均勻。

5.3.2 高可靠度

我們之前說明過，因為無刷馬達根據霍爾 IC 信號計算的反饋速度以閉迴路控制馬達速度，所以速度變動率低，可以穩定運轉。由於持續監控馬達速度，如果由於某些原因施加過大的負載且速度降低，或者如果馬達停止，將輸出 ALARM 信號，以便檢測故障。

此外，透過運用過負載資訊和過負載警告功能，可在過負載 ALARM 啟動之前檢測增加的負載。這樣可避免生產線突然停止，有計劃地進行維修作業。

5.4 穩定停止位置

進行高精度定位運轉時，通常使用步進馬達和伺服馬達，因為它們具有極佳的停止精度。然而，根據工作條件和使用方法而定，即使以廉價的調速馬達或交流馬達進行簡易定位運轉，或許也能滿足停止精度的要求。

若要在目標位置停止搬運和旋轉，需使用具有瞬間停止功能的速度控制器和驅動器。然而，為了檢測輸送物，必須在停止位置安裝檢知器，並且以可程式控制器等進行控制。

輸入停止信號時，由於轉子慣性慣量和負載慣性慣量的影響，馬達出現過轉後停止。此時，過轉量會根據裝置中的摩擦轉矩的增大而減少。

5.4.1 過轉量

AC 調速馬達 **DSC** 系列 25 W 和無刷馬達 **BLE2** 系列 30 W 的剎車特性如圖 5.12 所示。

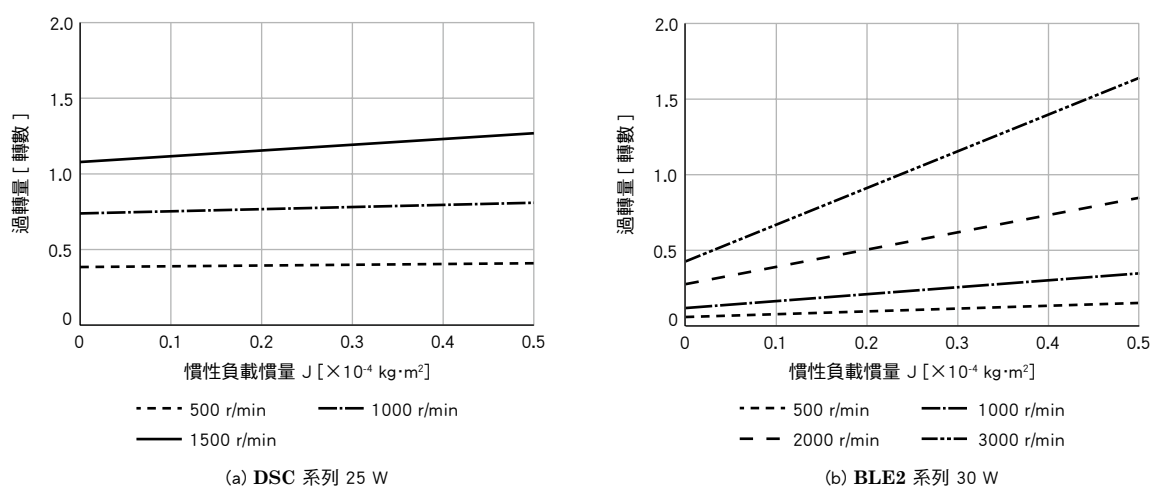


圖 5.12 剎車特性

這些剎車特性顯示無摩擦負載時負載慣性慣量與過轉量(平均值)之間的關係。由於旋轉能量在高速或大慣性負載下更大，因此過轉量也將增加。

5.4.2 過轉量偏差

AC 調速馬達和無刷馬達的過轉量都有偏差。圖 5.13 顯示馬達以負載慣性慣量 J 設為 $0.251 \times 10^{-4} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 且轉速設為 1000 r/min 時反覆運轉和剎車 100 次時的過轉量變化。

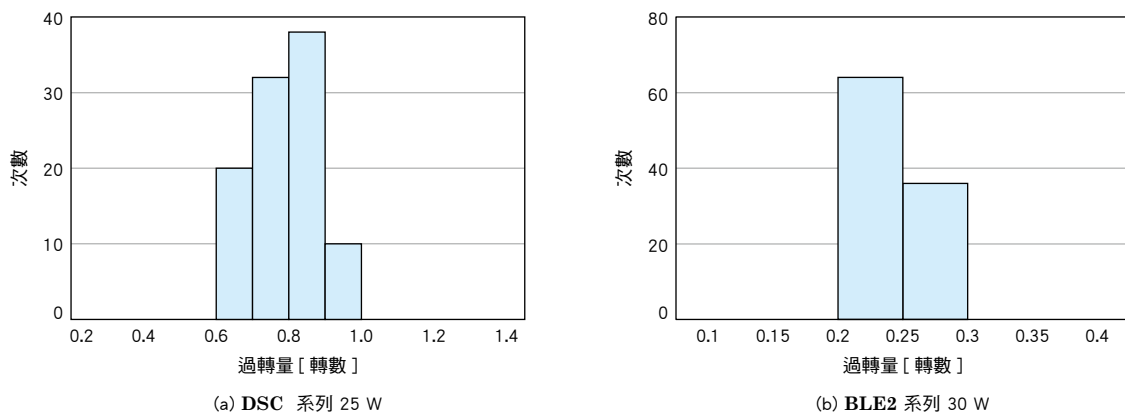


圖 5.13 過轉量偏差

許多 AC 調速馬達和無刷馬達與減速機組合使用。例如，與減速比為 10 的減速機組合時，在減速機軸測量到的平均過轉量與其變化為表 5.2 中所示的值。在這些數值中，應加上減速機內部齒輪的 1 到 2° 齒隙。

表 5.2 過轉量的平均值和偏差

產品	過轉量平均值	過轉量偏差
DSC 系列 25 W	0.078 轉 (28.08°)	±0.015 轉 (±5.40°)
BLE2 系列 30 W	0.024 轉 (8.64°)	±0.003 轉 (±1.08°)

過轉量的平均和變化之差異。

5.4.3 AC 調速馬達剎車方法

AC 調速馬達透過 TRIAC 的導通角大小來控制施加於馬達的電壓。輸入剎車信號時，TRIAC 關閉且閘流體開啟一段時間。如圖 5.14 中的紅色箭頭所示，在馬達的主線圈 (L) 和補助線圈 (S) 中經歷半波整流的同相電流過二極體。這樣可進行直流剎車 (發電剎車)，瞬間停止馬達。

根據在電源電壓相位與輸入的剎車信號時間而定，剎車電流開始流動的時間 (剎車開始時間) 最多延遲電源頻率一個週期。因此過轉量會發生變化。

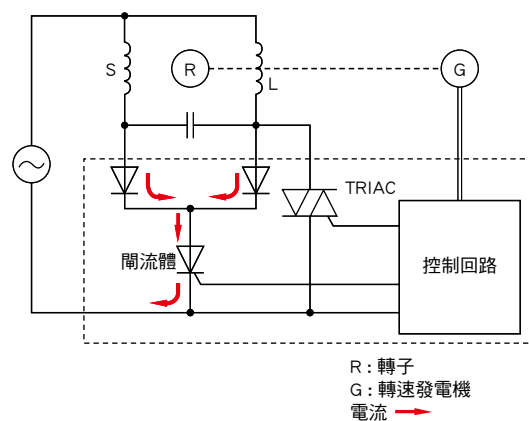


圖 5.14 直流發電剎車

運轉信號、剎車電流和馬達速度之間的關係如圖 5.15 所示。

比較左圖和右圖，可以從運轉信號關閉(剎車信號開啟)直到剎車開始時間和馬達停止時，觀察到一個電源頻率週期的差異。

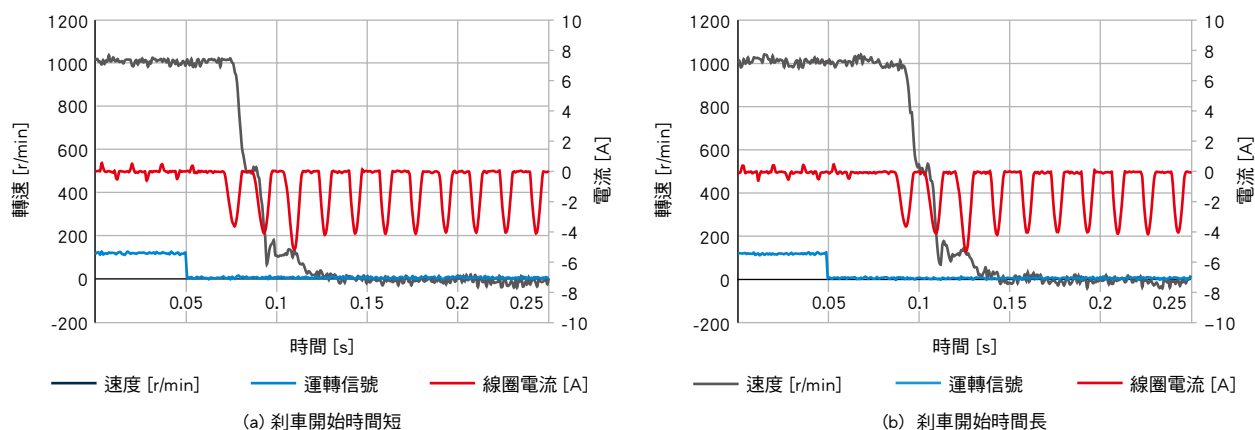


圖 5.15 AC 調速馬達的剎車波形

5.4.4 無刷馬達剎車方法

如「4.5 剎車(再生運轉)」中所述，無刷馬達在剎車期間作為發電機，而且透過將旋轉能量轉換為電能產生剎車轉矩，如圖 5.16 所示。如圖 5.17 所示，在運轉信號關閉(剎車信號開啟)後，再生電流立即流過線圈。因為可以在不受電源電壓相位與輸入剎車信號時間影響的情況下產生剎車轉矩，所以停止位置穩定。

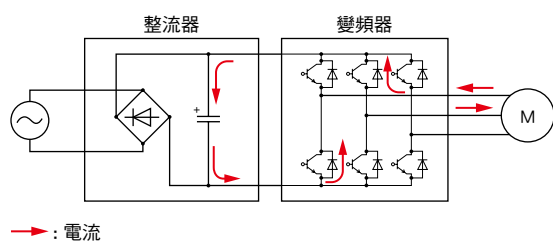


圖 5.16 再生制動

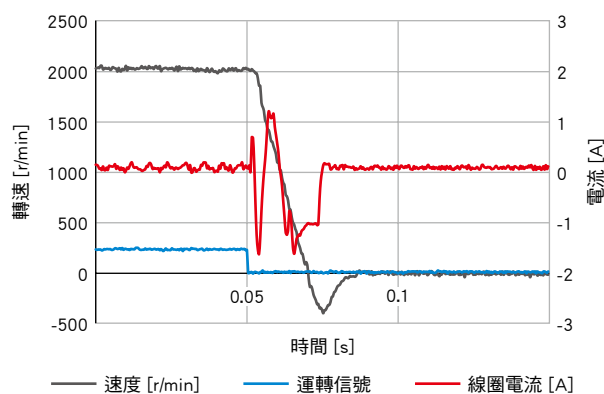


圖 5.17 無刷馬達的剎車波形

5.5 高效率、節能

根據 IEA(國際能源署)發佈的 2016 年世界能源展望報告，全球超過一半的總電力消耗與馬達相關。降低能源消耗是一個全球性的議題，在提高馬達效率方面，國際規格 IEC 60034-30-1 定義了針對 120 W 至 1,000 kW 感應馬達的效率等級。目前已建立至 IE4 等級，IE5 效率等級正在計劃中。

請參考圖 5.18。

內建永久磁鐵的無刷馬達不符合 IEC 60034-30-1 標準，但它們比三相感應馬達更高效，而且馬達與驅動回路組合的效率超過 IE5 效率等級(預期值)。接下來，我們將說明無刷馬達的減損技術，主要以東方馬達 **BMU** 系列產品為例。

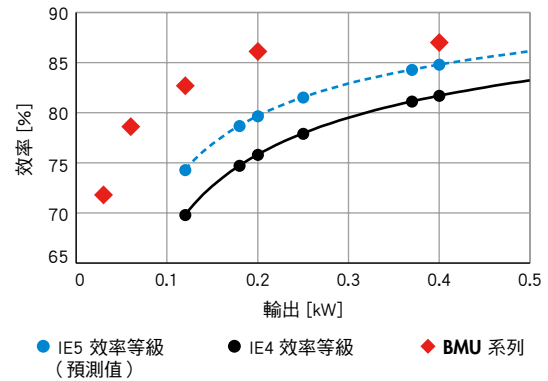


圖 5.18 BMU 系列
馬達與驅動器的合成效率

5.5.1 馬達損失

損失類別如圖 5.19 所示。馬達損失分為銅損、鐵損、雜散負載損失和機械損。通常，大量馬達損失包括銅損和鐵損。此外，馬達越小，銅損的比例越大，因此根據馬達尺寸採取有效的對策來減少損失是很重要的。

接下來，我們將說明損失的主要類型和減少損失的技術。

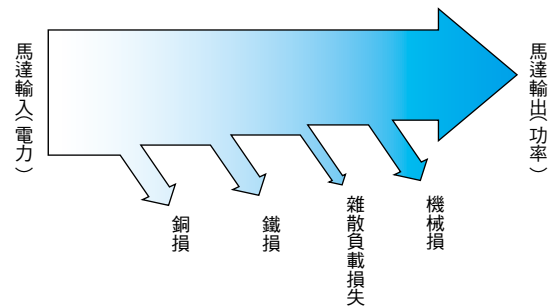


圖 5.19 馬達損失

5.5.2 銅損

銅損是指由流過銅線的電流引起的焦耳損，可以使用以下公式計算。

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

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

P_c : 銅損 [W]	ρ_c : 導體電阻率 [$\Omega \cdot m$]
R : 線圈電阻 [Ω]	l : 導體長度 [m]
i : 線圈電流 [A]	S : 導體截面積 [m^2]

如公式 (5.4) 所示，銅損會隨電流值和線圈電阻值下降而減少。此外，公式 (5.5) 顯示，導體截面積越大，線圈電阻值就越小，因此銅損也會隨之減少。因此，以高槽滿率纏繞粗銅線至關重要。銅線佔據的槽截面積(含銅線線圈的定子部分面積)比例稱為槽滿率，這個數值越大，銅線線圈中未使用的空間就越小。

a. 電流值減小

在感應馬達中，由定子產生的旋轉磁場使感應電流通過轉子內的籠型導體，藉此產生轉矩。線圈電流包含用於產生轉矩的電流和用於產生感應電流的電流。此外，線圈電流和感應電流會導致定子線圈和籠型導體中的銅損。

由於無刷馬達在其轉子中使用永久磁鐵，因此不需要感應電流。由於只需要產生轉矩的電流，因此可以降低線圈電流，這點不同於感應馬達。由於轉子沒有銅損，而且定子線圈的銅損可減少，因此銅損比感應馬達少。

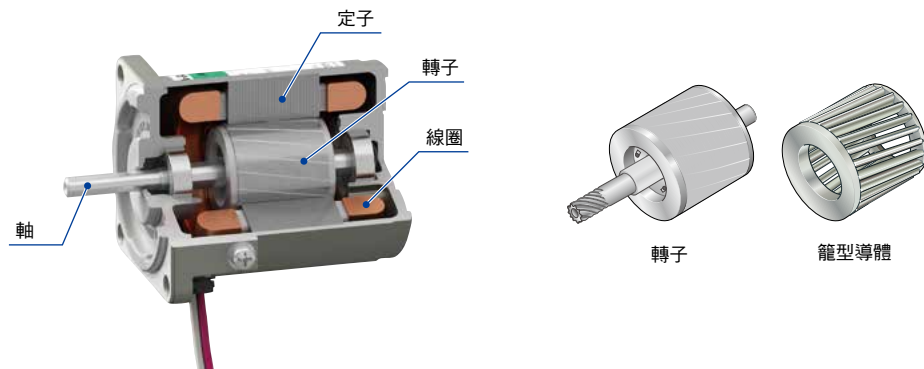


圖 5.20 感應馬達結構

b. 線圈電阻值減小

近年來開發的無刷馬達，包括 **BMU** 系列，使用的釹燒結磁鐵能積是傳統釹黏結磁鐵的 6 倍。因為轉子磁鐵的磁通量密度增加，所以與具有相同輸出的傳統產品相比，線圈的匝數可減少。

然而，由於磁通量密度已增加，因此必須擴大齒寬，如圖 5.21 所示。為了解決這個問題，採用不使用馬達殼的無框架結構，並且增加定子鐵芯的外徑，提高線槽面積。此外，還開發出提升線對準的技術。由於這些措施，可使用更厚的導體，從而降低線圈電阻和銅損。

此外，磁通量密度增加不僅減少線圈的匝數，還可縮短定子核心的長度。

相較於傳統產品，**BMU** 系列採用高性能磁鐵，搭配改進定子形狀和線圈技術增加的槽滿率，使定子核心長度減半，銅損減少 11%。

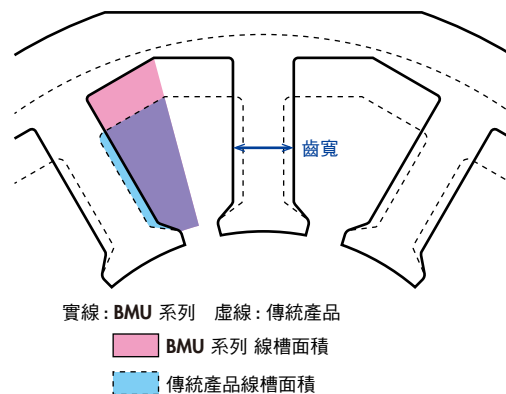


圖 5.21 線槽面積

5.5.3 鐵損

鐵損分成渦流損和磁滯損。由於磁通量密度的時間變化以及流過定子核心和轉子核心的流量，在核心內發生渦流損。在交變磁化引起的磁化能中發生磁滯損。由以下公式表示。

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

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

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

P_i : 鐵損 [W]	f : 磁場頻率 [Hz]
P_h : 磁滯損 [W]	B : 最大磁通量密度 [T]
P_e : 渦流損 [W]	m : 核心質量 [kg]
k_h : 比例常數	t : 電磁鋼板厚度 [m]
k_e : 比例常數	ρ : 電磁鋼板電阻率 [$\Omega \cdot m$]

如公式 (5.7) 和公式 (5.8) 所示，馬達鐵損相關的要素可分成：

- 比例常數和電阻率，由電磁鋼板材料決定
- 電磁鋼板厚度
- 磁場頻率、最大磁通量密度及核心質量，由馬達設計決定

為了減少馬達鐵損，理想的電磁鋼板為薄、鐵損低、具有高飽和磁通密度及良好的頻率特性，但每個特性都有所取舍。此外，因為需要考慮可加工性和成本，所以使用哪些特性取決於所需的馬達特性。關於與設計相關的要素，必須優化所使用的磁鐵以及銅損和鐵損之間的平衡。

a. 磁滯損減小

如公式 (5.7) 所示，磁滯損與最大磁通量密度的 1.6 次方(在某些情況下為 1.5 到 2 之間的次方)成比例。然而，如果最大磁通量密度低，最大轉矩也會減小，因此必須選擇具有較低保磁力和低磁化能的電磁鋼板，以便在保持馬達性能的同時減少鐵損。

b. 渦流損減小

高轉速馬達和多極馬達對其電磁鋼板具有高激磁頻率。如公式 (5.8) 所示，因為渦流損與最大磁通量密度、磁場頻率和電磁鋼板厚度的平方成正比，所以使用薄電磁鋼板可有效降低高頻鐵損。在低損馬達中，採用厚度 0.35 mm、0.25 mm 等的電磁鋼板，甚至正在研發更薄的材料。

此外，添加非磁性且具有高電阻值的矽 (Si) 會增加電磁鋼板的固有電阻值，使渦電流難以流動。然而，添加非磁性成分同時會降低最大磁通量密度，使最大轉矩減小。電磁鋼板製造商致力於透過調整矽 (Si) 量、控制晶體結構等方式，研發增加這兩種矛盾性質的產品。

BMU 系列採用高性能磁鐵，使定子長度為傳統產品的一半，並結合高性能電磁鋼板，使鐵損降低 50%。運用這些技術，使 **BMU** 系列的全長比傳統產品短 12%、輸出增加 33%，效率提高 7%。

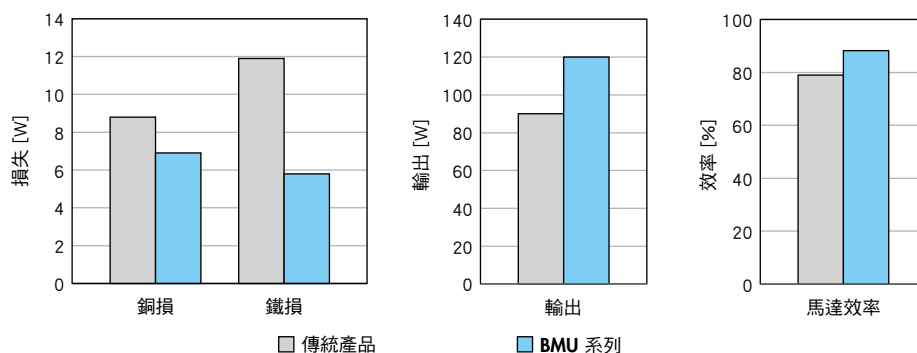


圖 5.22 **BMU** 系列損失改進

5.5.4 雜散負載損失

從總馬達損失中減去銅損、鐵損和機械損後剩餘的損失為雜散負載損失。通常這被視為不明原因的損失。然而，由於近年來分析技術的改進，雜散負載損失被視為因漏磁通等原因造成的局部損失。

5.5.5 機械損

馬達機械損是指軸承、油封和其他機械接觸區域的摩擦損失，以及因透過感應馬達所使用的軸直接連接的冷卻風扇類型造成的風阻損失。無刷馬達的損失很少，而且不需要透過軸直接連接的冷卻風扇，因此可以抑制機械損。

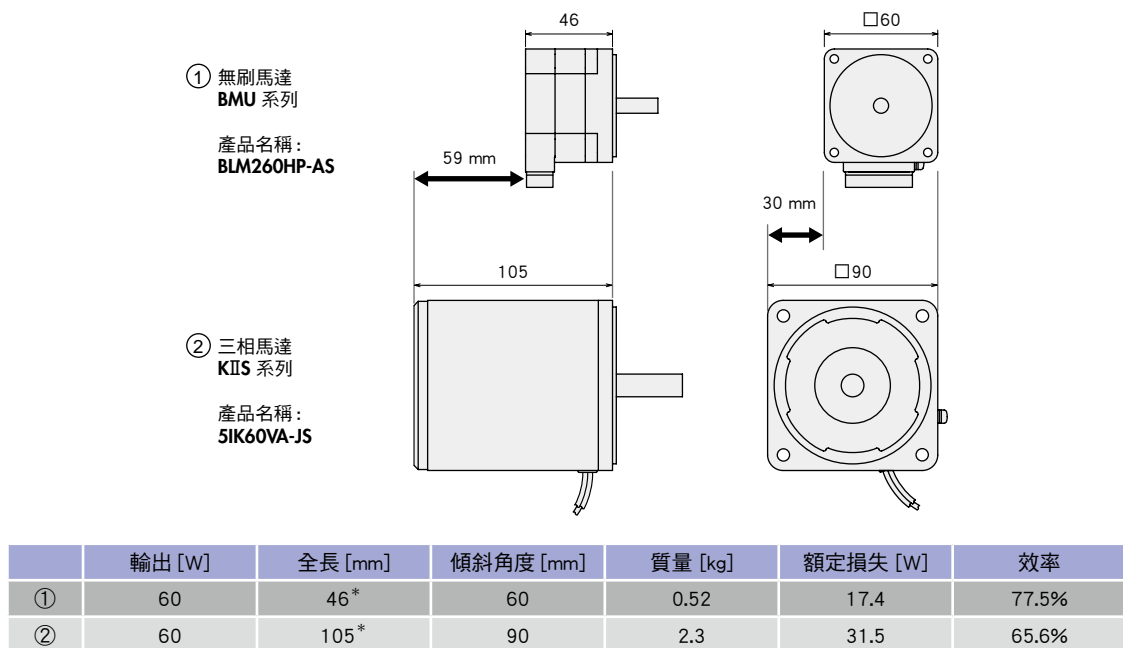
5.6 小型且輕量的馬達

無刷馬達比三相馬達更小且更輕，而且仍提供相同的額定輸出。馬達的額定輸出是當馬達在規格所指定的條件下（例如環境溫度和電源電壓）連續運轉時，所使用部件（主要是線圈）的溫度上升滿足容許溫度範圍的輸出。

根據「5.5 高效率、節能」中說明的高效率、節能技術，無刷馬達的馬達損失很少。馬達溫度上升是損失和熱釋放的平衡，因此損失越少，馬達就能越小。

無刷馬達的形狀和損失量與相同輸出的三相馬達比較如圖 5.23 所示。

由於馬達小型且輕量，因此裝置體積小、重量輕。電池驅動車輛更加強調小尺寸和輕便，因為它們與車輛行駛的距離直接相關。



* 距離圓軸類型安裝表面的長度（無減速機）

圖 5.23 形狀與損失的比較

後記

感謝您閱讀「東方馬達技術手冊 無刷馬達篇」。

本手冊的主要目的是幫助讀者了解無刷馬達的結構和運轉原理，以便了解它們與 AC 調速馬達和變頻器的差異。希望讀者了解無刷馬達的特性與其他馬達有何不同，例如寬速度範圍和速度精度。

實際使用無刷馬達時，不僅需了解馬達的特性和特色，還要了解產品功能、與其組合的減速齒輪特色等。相關資訊請參閱型錄和使用說明書，並且使用適用於無刷馬達或其他調速馬達的裝置。

我們希望本技術手冊能幫助讀者解決當下的問題並為未來裝置研發提供靈感。



台灣東方馬達股份有限公司