

船用交流推進驅動系統

著者/胡穗樂 陳韋毅

海軍官校正期60年班
美國北愛荷華大學工業技術研究所博士
現任國立高雄海洋科技大學輪機工程所副教授

海軍官校正期83年班
國立高雄海洋科技大學輪機工程所在職研究生
歷任大岡軍艦輪機官、馬公後勤支援指揮部場主任、海軍官校中隊長
現任海軍官校軍事學科部輪機組少校教官

壹、系統特性

交流電推進驅動系統通常使用於中高功率範圍的船舶。交流電馬達的製造已可以達到60,000 hp的額定值，而且不會對可安裝的最大推進力有任何明顯的實體限制。不管是整合式或專用的動力系統配置都可使用交流電推進系統；不過，通常都會選用整合式系統，尤其是客輪。實務上，整合式動力系統的大型船用馬達負載是直接連接在主匯流排電壓位準，小一點的負載是由降壓變壓器提供，而馬達發電機組則是用於敏感負載。它可以使用於任何類型的原動機，但中速柴油引擎則是常見的發電機驅動選擇。多數大型系統所需的發電容量須在主配電板上使用中壓（4160或6900 V）設備。

交流電馬達的損失比直流電馬達少，因此能提供較高的總傳輸效率。交流電傳輸系統的總損失，介於原動機與螺旋槳軸之間，為6-8%的範圍內。選擇交流電馬達的另一個益處是免除了直流馬達整流子所需的保養。

就中高功率範圍的電動推進系統而言，大部份的馬達是屬於有繞組磁極的同步式。直接驅動式同步馬達具有96至98%效率，通常比感應馬達要高出3至4%。除了效率較高外，同步馬達的轉子與定子之間的氣隙較大，更能容忍不對準的情況，因此，有助於安裝並減少維護的工作。

早期應用時，交流電驅動裝置通常與渦輪原動機的使用有關。一般而言，系統含有一個能驅動直接連接的高速發電機（供電給一個低速直接驅動的同步馬達）的單一渦輪。渦輪轉速對馬達轉速的有效齒輪比是透過發電機電磁極與馬達磁極的比來固定。螺旋槳的速度控制是依據渦輪轉速的改變。沒有功率轉換技

術的情況下，這些早期的系統受限於一種或兩種固定的轉速比。只有配備磁極變換繞組的感應馬達才有第二種轉速比。

近期的應用是使用功率轉換器來將定頻交流電變成變頻交流電，而且也用於直接驅動同步馬達。同步交流馬達的轉速與作用在其定子繞組的頻率成正比。因此，交流電驅動系統的轉速控制是藉由功率轉換器的輸出頻率調整來達成。功率轉換器的輸出頻率會對節氣門軸的電位計或數位位置編碼器所產生的小參考電壓有反應。

欲使交流馬達逆轉，可藉由轉換器內建的整流器來顛倒功率轉換器所產生的電壓的相位順序。同步交流馬達的轉子只是根據作用於定子繞組的電壓的頻率和相位順序旋轉。

貳、交流電驅動裝置的功率轉換器

功率轉換器可將交流／直流電轉換成直流／交流電，或從一個頻率轉換成另一個頻率。海事推進應用上所使用的典型轉換器包含一列控制整流器裝置，編排如圖1所示。交流電轉換器編排使用相同實體配置的整流器裝置時，像是負載轉換換流器(LCI)，如圖2所示，或脈寬調變換流器(PWM)，如圖3所示，即將單段式功率轉換器視為一個「來源轉換器」或「負載轉換器」，依它在電路的位置而定。習慣上，來源轉換器是接至輸入電源，而負載轉換器則是接至馬達。LCI和PWM都稱為「雙段式轉換器」，因為它們必須轉換功率兩次。一次是藉由來源轉換器，而另一次則是藉由負載轉換器。變頻器(CCV)是另一種功率轉換器。它被歸類為單段式功率轉換器，因為它的功率只轉換一次。同步馬達可以與LCI、PWM或CCV一起使用，不過，只有PWM和CCV轉換器適用於感應馬達。

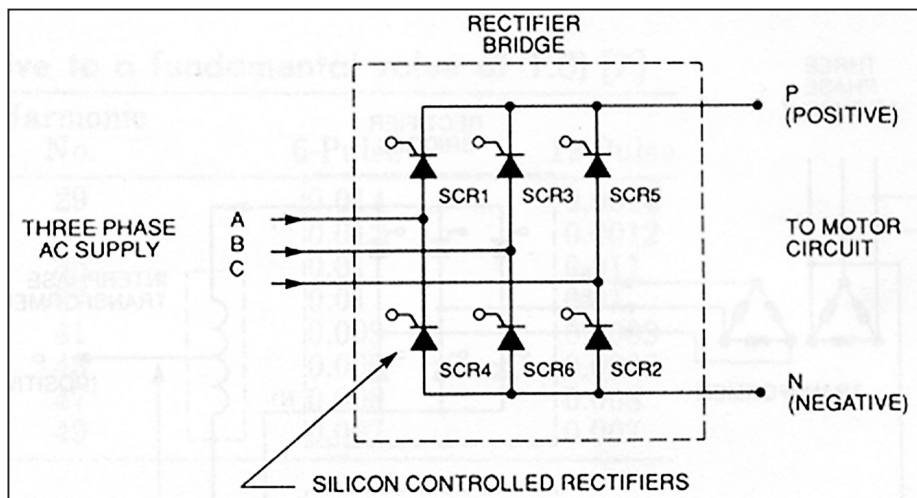


圖1 六脈衝直流功率轉換器電路

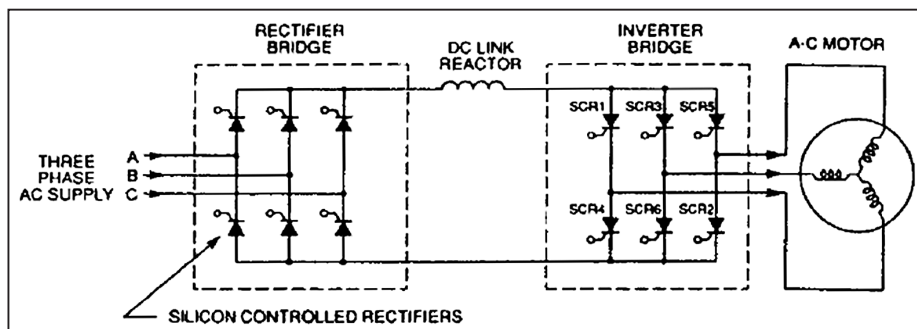


圖2 六脈衝負載轉換換流器電路

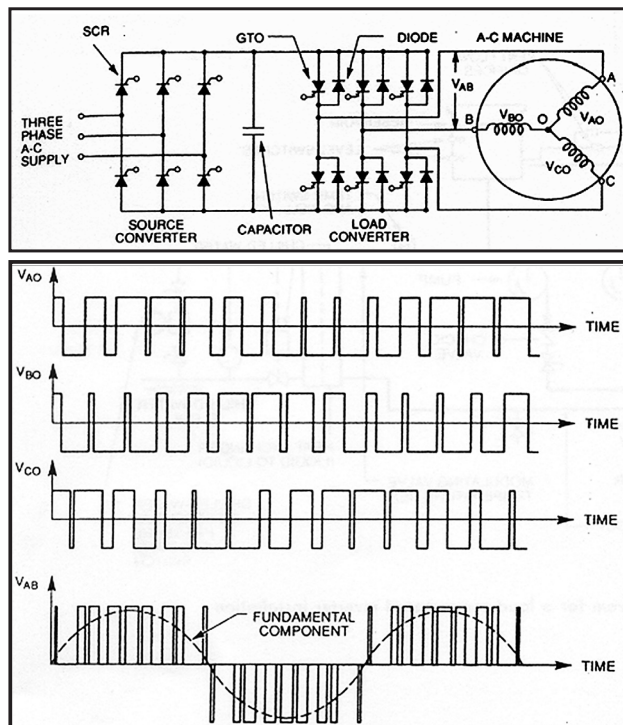


圖3 脈寬調變電路和輸出波形

由於交流馬達的轉速是根據電的頻率，因此功率轉換器和交流馬達的組合可使螺旋槳的轉速在整個轉速範圍內能平順地調整。一般控制馬達轉速的方法是讓功率轉換器對節氣門軸的電位計或數位位置編碼器所產生的小參考電壓有所回應。至於可控制螺距的螺旋槳系統，轉換器參考也可連接到螺距控制，以優化推進效能。

針對定距螺旋槳的安裝，馬達旋轉的方向可輕易地以電子的方式，藉由顛倒作用在馬達的相位順序來改變。

在功率轉換器的控制上，微處理器的使用已大大地取代了類比電路。除了能平順且靈敏地控制推進馬達，微處理器的使用也讓軟體完成了許多必須以困難又昂貴的方法才能藉由硬體達到的有用功能和特色。例如，由微處理器執行的程序能藉由將資料輸入到馬達的一個數學熱模型，來動態地預測馬達溫度，而在馬達過熱前就事先獲得警告。一個類似的技巧可用來針對功率轉換器的功率處理裝置，提供事先的警告，增強設備的使用度。微處理器也可用於執行自我檢查，並發現有任何異常時，提醒操作員。大多數是強調內建的診斷和檢修軟體。這些

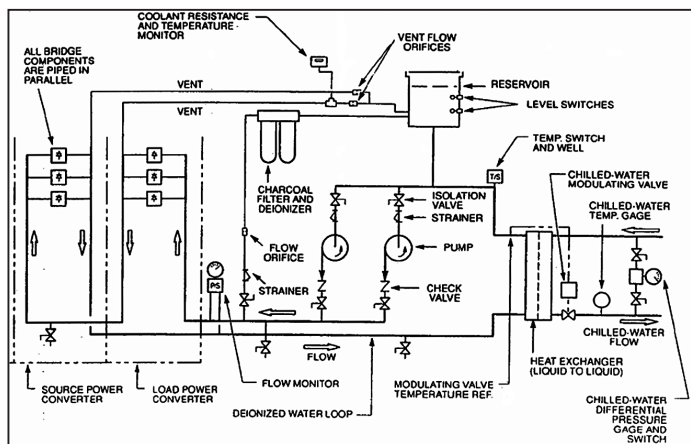


圖4 負載轉換換流器安裝的去離子水冷卻系統圖

軟體能讓操作員執行所有重大的保養作業。

功率轉換器單元內所產生的熱是透過空氣或水的冷卻來去除。空氣冷卻通常會導致一個已知額定值的較大設備，並增加船舶HVAC系統額外的熱負載；不過，大多數轉換器是以內部的風扇冷卻。風扇使周圍的空氣吹過半導體裝置及其散熱片。水冷卻的設備配置較精簡，但需要有一個密閉的主冷卻迴路，使去離子的水能於半導體散熱片和一個連接至船舶冰水系統的水

對水熱交換器內循環。去離子水系統的流量、溫度及傳導性必須加以監控。圖4是一個典型使用於負載轉換換流器安裝的去離子水冷卻系統圖。去離子水與半導體散熱片之間的介面必須設計成確保不會洩漏。

圖5是裝有門閥控制電線的矽控制整流器的照片。此整流器是使用於海事推進的典型功率轉換器。圖6是用於整流器的氣冷式散熱片配置，而圖7則是水冷式的配置。

變頻器(Cycloconverter)。雖然變頻器(CCV)早在1930年代就應用於同步馬達驅動，但直到最近固態功率電子裝置（亦即矽控制整流器）的發明才讓變頻器

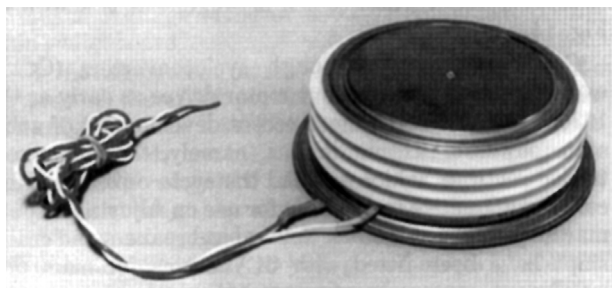


圖5 使用於海事功率轉換器的典型矽控制整流器

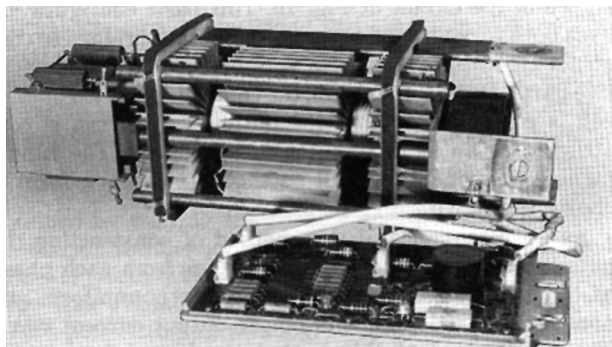


圖6 氣冷式散熱片的矽控制整流器

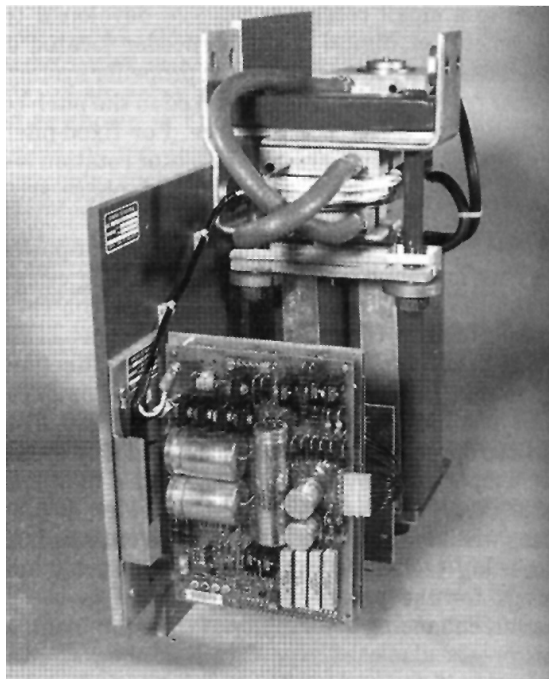


圖7 水冷式散熱片的矽控制整流器

變成使用於可調速海事推進馬達的一項有發展前途的技術。有幾艘破冰船和郵輪已配備CCV驅動裝置，用於主要的推進。

變頻器是把矽控制整流器(SCR)當作開關，來連接交流推進馬達的端子與定頻交流電的連續相位，而製造一種較低頻的可調交流電壓波形，供推進馬達使用。基於方便說明CCV的作用原理和波形，連接的是三相六脈衝CCV的單相，如圖8的電路所示。此基本配置乃使用順向和逆向電橋來建構一個同時具有正負部份的輸出波形。作用時，每個單元的傳導期間是受到控制的，為的是可以構成一個近似正弦曲線的波形。圖9是它的基本組成和輸出波形。

建構輸出波形方法的結果是來自輸入的每個相位的電流，通常是由輸出電流波的不平均且不同步的部份所構成。其意義是CCV所牽引的諧波電流不再是一個整流器單純的一連串諧波，而是接近連續函數（考慮振幅及頻率的變化）的成分光譜。因此，調節過的濾波器，例如：用於直流、LCI，及PWM驅動裝置，以改良功率品質，這並不是一個在CCV驅動裝置執行相同功能的有效方法。

一個12脈衝CCV變頻器使用的SCR單元數是一個6脈衝電路的2倍。正如直流對交流轉換器的情況，脈衝數增加會導致輸出波形的諧波振幅降低。就這點而言，12脈衝CCV可產生比相同額定值的6脈衝轉換器更少的諧波。值得注意的是，隨著設計者對SCR感應的排序不同

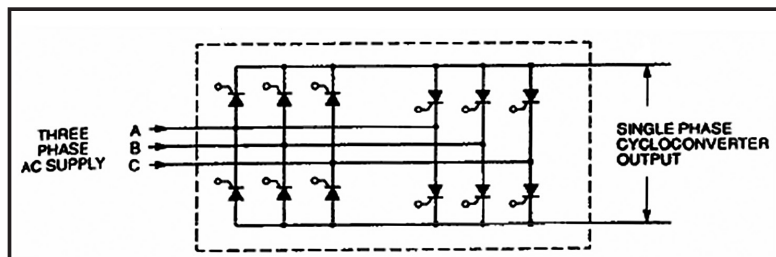


圖8 變頻器的單向電路

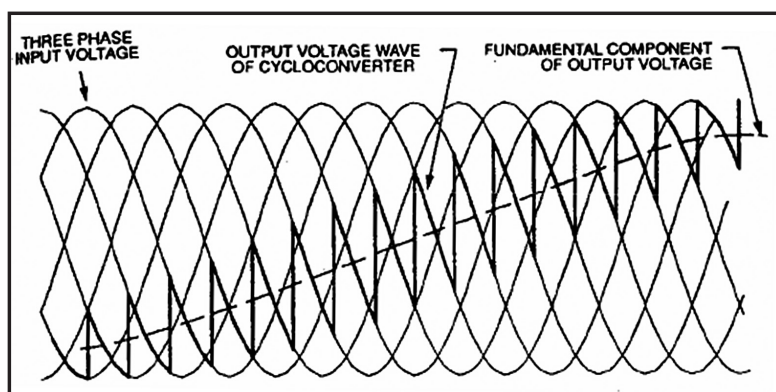


圖9 單向變頻器輸出波形

所使用的控制機制而異，諧波振幅的大小和輸入功率因素位移會有很大的差異。

CCV的輸出頻率和電壓都是藉由改變容許SCR開始傳導的角度來控制。藉由延遲傳導，就可以在輸入功率系統裡，導入一個電流與輸入電壓之間的延遲。此特性在破冰船的應用上（需要在低螺旋槳轉速產生高扭力的結冰情況）最為顯著，而反應在CCV就變成是在低電壓的高電流。對高電流和低電壓的要求會對電力系統造成額外的要求，而必須以較大且較昂貴的發電機設計來予以滿足。不過，發展零轉速時的高扭力的能力並不是大多數船舶的一個重要特色。

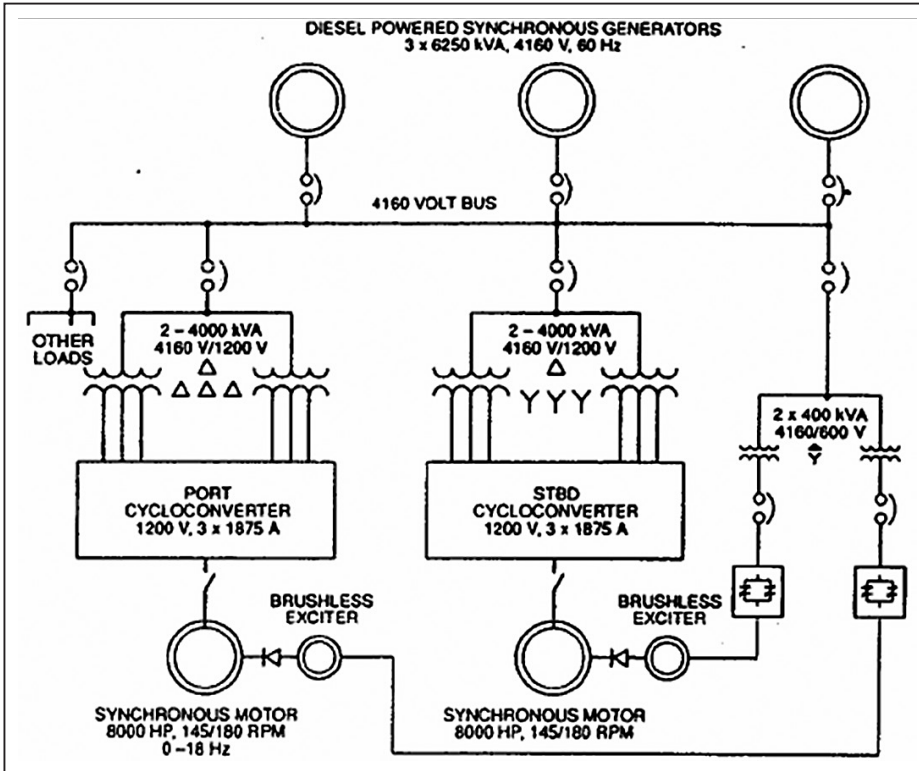


圖10 輕負載破冰船用的典型變頻器驅動系統

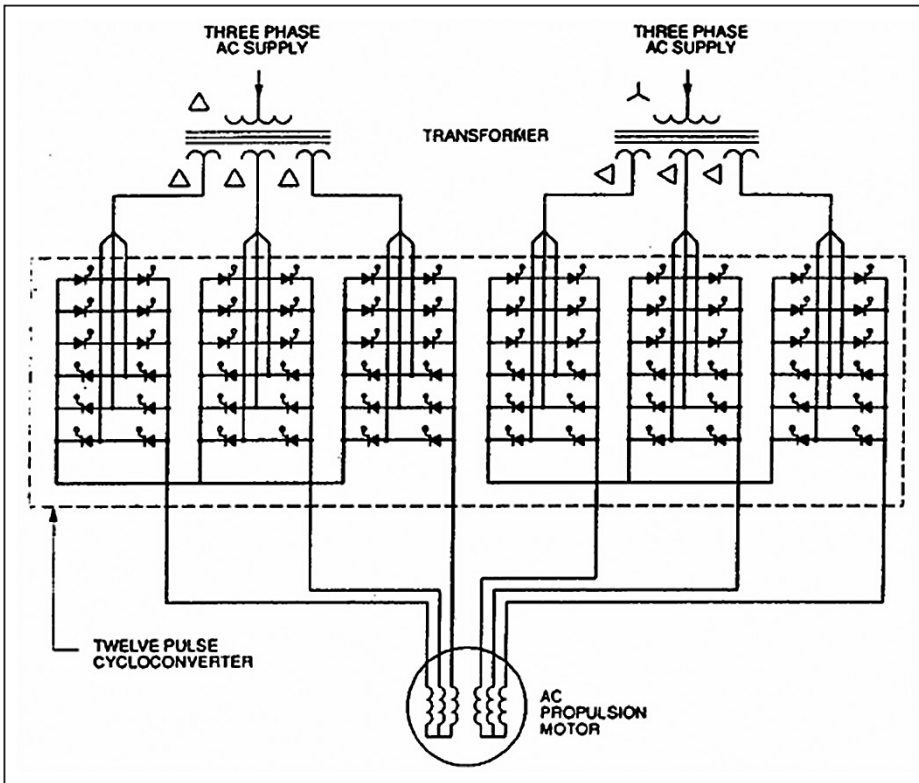


圖11 12脈衝變頻器驅動電路

應用適當的控制系統時，變頻器可以模擬直流馬達的動態特性，提供從零至全軸rpm的高軸扭力，並快速地改變螺旋槳的旋轉方向。圖10是有CCV式靜態變頻器的典型輕負載破冰船的電氣設備的配置和額定值。變壓器用於主匯流排與功率轉換器的輸入之間。此輸入是為了讓4160 V發電機電壓配合CCV設計所需的1200 V。變壓器繞組的Y型和三角形接法是用於相位轉換輸出電壓，以獲得諧波消除。

三相對三相變頻器有兩種常見的內建形式，使用18或36條載波器切換路徑。兩種形式的差別在於對功率系統、輸入功率及馬達扭力脈衝特性的功率因素要求。12脈衝36腳CCV已使用於郵輪，且能產生接近20 Hz的令人滿意的輸出波形。

CCV變頻器的基本構成區塊與直流功率轉換

器一樣。它同時具有順向和逆向電橋。圖8的電路說明單向的CCV，而圖11則是針對完整的36腳12脈衝CCV驅動。

通常使用於船舶推進的變頻器是屬於頻率類的轉換器。它會隨著供電電壓，將電流從一個單元轉換至下一個單元。供應此電壓的發電機與相關的反應功率將感應到的CCV當作是一個在全馬達轉速時功率因素範圍介於0.75至0.85的負載。轉速降低時，功率因素也降低。這會傾向增加所需的發電機尺寸。不過，馬達則會受益於CCV的這個影響，因為它不需設計成須傳送任何反應功率到CCV。同步馬達使用一個CCV驅動時，它的功率因素通常是規定為一(1.0)。相反地，一個具有相同功率定額的馬達與一個負載轉換換流器驅動裝置一起使用，則會設計成0.9的功率因素。

負載轉換換流器(Load-commutated inverters)。負載轉換換流器(LCI)的基本電路是由兩個功率轉換器所構成——一個來源轉換器和一個負載轉換器一如圖2所示。來源轉換器是連接至輸入電源將交流電整流成直流電，而負載轉換器的連接則是藉由使用推進馬達，將直流電變回成交流電。直流連結反應器是將來源轉換器的直流輸出連接至負載轉換器的直流輸入。連結反應器是一個能量儲存裝置，可衰減來源轉換器的直流輸出漣波，且有助於將任何可能在脈衝馬達產生的或脈衝軸系統傳輸的扭力脈衝隔離功率系統。

負載轉換器的電流轉換（電流從一個相位轉移至另一個相位）會隨著供應用於轉換的電壓的同步推進馬達（負載）而異。這是藉由一個引導功率因素的操作。在這些情況下操作時，在一個LCI電路的完整迴路裡，矽控制整流器(SCR)傳導的順序和電流的路徑會遵照圖12 六脈衝配置的說明。圖中較粗的線代表顯示的六種可能組合的每一種的帶電路徑。合成的磁動勢

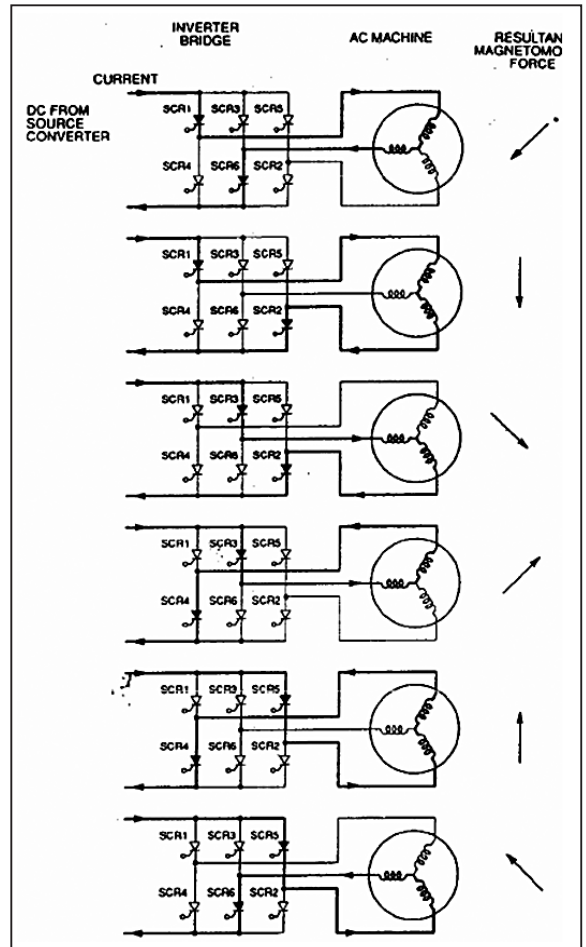


圖12 負載轉換換流器傳導順序

代表馬達內磁場的旋轉，它會產生軸旋轉。圖中簡化的馬達代表每個迴路的一支機械軸旋轉，一部兩極機器。在實際上，馬達會有很多對的電極。

低於約10%轉速時，馬達（負載）無法產生足夠的電壓將直流轉換成交流換流器電橋。因此，馬達轉速低於10%的操作是藉由依序開啟整流器功率半導體，來同步低頻交流電波，並容許自然產生的交流電線過零執行轉換來完成。此機制傾向在低速產生脈衝馬達扭力的特性。不過，由於螺旋槳的低負載扭力，所以透過此速度的加速通常很快。有一種較複雜的技術可以應用於12脈衝轉換器。那就是操作兩個轉換器電橋和兩個繞組馬達，當作是一個雙相CCV。在LCI控制器的軟體應設計成可自動依低馬達轉速的需要，將LCI切換成

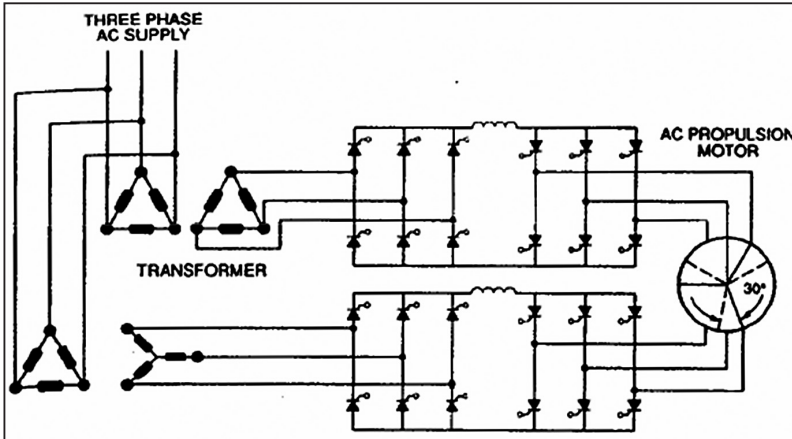


圖13 12脈衝負載轉換換流器電路

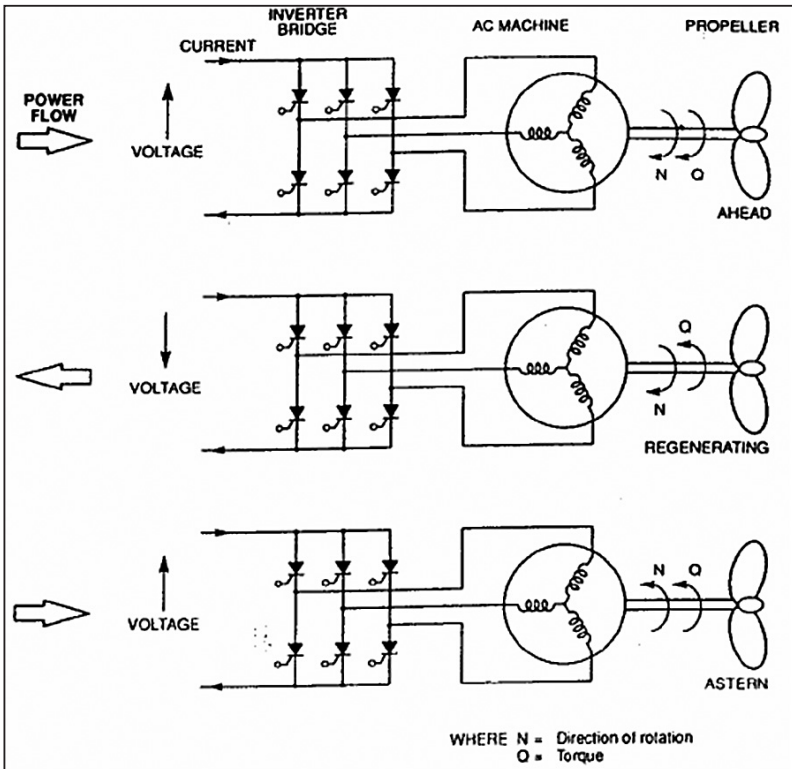


圖14 有負載轉換換流器的螺旋槳逆轉順序

CCV模式。

LCI應用的馬達通常的額定值為0.9功率因素，因為它們必須提供換流器的轉換功率。發電機也必須供應反應的功率給LCI的整流器部份。它在全負載時也是出現0.9功率因素負載。

適當的轉換時機是在一個電子調節器的控制之下。此時機是透過作用一個功率脈衝在接近的控制整流器的閘極來起始事件。為協助調節器計算適當的時機，以起始閘極觸發，有關轉子位置的資訊通常是由裝在馬達軸端的一個軸位置編碼器來提供。負載轉換換流器輸出是由馬達的頻率來決定。

較高功率馬達的負載轉換換流器通常是設計有12脈衝轉換器。不過，也可以使用各式各樣的變壓器和轉換器配置來建構18或24脈衝電路。來自這類配置的諧波振幅降低被發現是有益的。馬達的密閉工程協調和功率轉換器參數是必要的，因為馬達繞組需要特別的設計，且通常比傳統的設計需要更多的端子連接。曾有幾種配置使用於編排12脈衝功率轉換器。圖13是此類電路的範例，可以應用於較高功率的12脈衝海事推進驅動裝置。正如前述，12脈衝轉換器電路是利用兩個6脈衝轉換器。這兩個轉換器是由個

別的變壓器繞組連接，以產生兩個偏置30度的輸出電壓。由三角形接法的繞組作用在一個電橋的電壓是在一次電壓的相位，Y型接法的電壓是偏置30度的相位。馬達是使用兩組獨立的繞組構成，且偏置30度時，如圖13，就不需要輸出變壓器。18或24脈衝電路的較高階驅動裝置可使用各式各樣的變壓器和轉換器配置來建構。當使用其它功率轉換器的情況下，脈衝數增加會降低輸入和輸出波形的諧波振幅，但需要額外的設備。

若計畫使用調節過的濾波器於功率系統，以降低諧波位準，應考量進行分析，以確保不想要的共振不會發生。共振的發生是由於主匯流排電壓的調節受到馬達/LCI/螺旋槳系統產生的頻率干擾所影響。

一個LCI會容許電力以任一方向流入或流出推進馬達。定距螺旋槳逆轉時，推進馬達會短暫地重新發電到交流電系統，在逆向旋轉前就先讓馬達慢下來。圖14是使用於定距螺旋槳的三種LCI操作模式—船頭、重新發電及船尾。藉由改變作用於負載換流器的閘極脈衝的順序就可讓馬達逆轉。因此，馬達的船尾操作是由一個電子調節器，而非逆轉開關的機械操作來決定。

靜態功率轉換器的LCI形式已應用於許多工業馬達驅動，但很少應用於海事驅動裝置。1980年代末期，伊莉莎白2世皇后號(Queen Elizabeth 2)的更新就是LCI轉換器應用於主推進的一個著名例子。在那艘船上，LCI功率轉換器是用於啟動主馬達，並將它們加速到72 rpm，供低功率、高效率的巡航使用。72 rpm時，LCI輸出頻率為30 Hz，且能傳輸約5.5 MW至可控制螺距的螺旋槳。需要更多功率時，螺旋槳螺距會縮短，以產生較小的扭力，而LCI功率轉換器會將馬達提高到全速，產生60 Hz的輸出頻率。達到144 rpm後，馬達會與主匯流排同步，而接至LCI的電路會形成斷路。一旦連接到主匯流排後，螺旋槳螺距可能增加，從系統導引全部的額定44 MW。

脈寬調變轉換器(Pulse-width modulated converters)。脈寬調變(PWM)轉換器的基本電路與LCI電路類似，因為它也是由兩個功率轉換器（一個來源轉換器及一個負載轉換器）構成。PWM與LCI不同的

是，在交流電波的任何部份負載電橋切斷馬達電流的能力。馬達電流的切換方式有透過使用外部能量儲存裝置或使用本質上能阻止電流流動的整流器元件「像是閘極關閉(GTO)閘流體」。圖3是一個使用GTO閘流體裝置的PWM轉換器。

其來源轉換器是連接至輸入功率，將交流整流成直流，而負載轉換器的連接則是將直流轉換回交流供推進馬達使用。直流連結電容器有助於保持一個固定的電壓進到負載轉換器的輸入端。交流輸出波的基本組成是藉由開啟和關閉GTO，以形成可變脈寬，正如圖3所示的電壓波形。脈衝的正確時機是由一電子調節器控制。它是藉由一個閘極電流的正脈衝來開始傳導，而藉由將一個負電流脈衝作用於閘極來控制關閉。

脈寬調變轉換器的特性是有一個很高的輸入功率因素，達到0.9，相較於使用LCI或CCV轉換器的系統，它們的範圍介於0.75至0.85。較高的系統功率因素會降低對發電機設計（具有特殊功率因素額定值）的需要。

定距螺旋槳逆轉時，由推進馬達流出的再生電會升高直流連接電容器電壓，因為能量無法流回到交流系統。不管是在一個電阻器內，還是在複製的來源轉換器內，要使此功率消失的方法都需要能在逆轉時傳導電流。馬達逆轉是藉由改變作用於負載換流器的閘極脈衝的順序。因此，馬達的船尾操作是由一個電子調節器，而非逆轉開關的機械操作來決定。

靜態功率轉換器的PWM形式已應用於許多中低功率工業馬達驅動，但很少應用於海事推進驅動裝置。不過，較高速的感應馬達，透過減速齒輪驅動，已使用於某些安裝的推進動力。由於不利的使用環境和成本效益，PWM轉換器較常使用於中高速感應馬達的推進器驅動裝置。早期一個著名的PWM轉換器應用是使用於動態定位管線鋪設船Lorelay號。它有7個可調速PWM感應馬達驅動裝置用於推進器和推進。

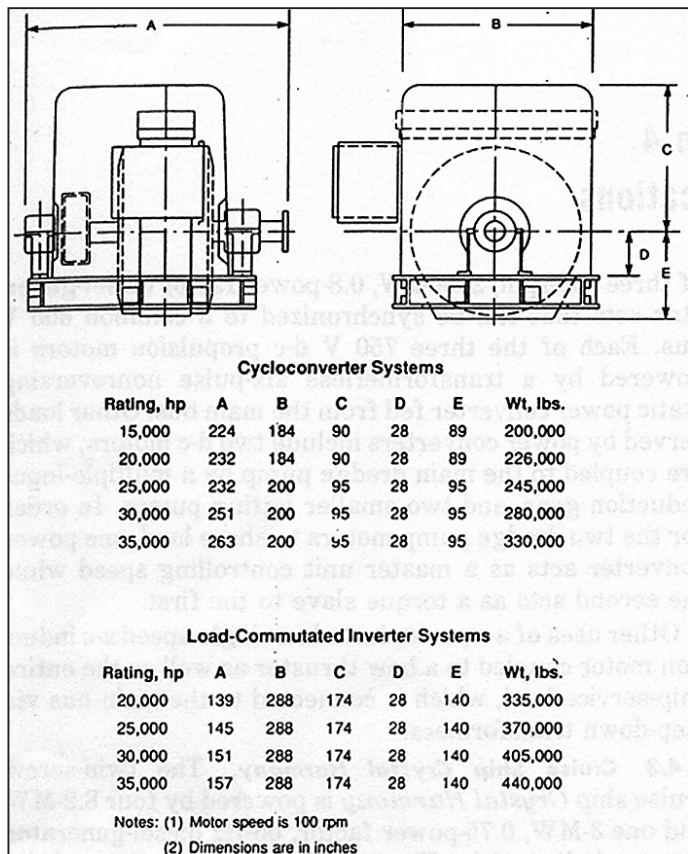


圖15 變頻器和負載轉換換流器系統裏推進馬達的大約尺寸和重量

參、交流驅動裝置用的馬達

與變頻器或負載轉換換流器一起使用的馬達絕緣系統和冷卻供應需特別注意確保在容許的溫度上升範圍中操作。馬達通常是屬於繞組磁場式，由滑動環或無刷勵磁機提供勵磁。無刷勵磁機的設計必須使所需的勵磁電力能在馬達的全部轉速範圍內（包括零轉速）都可傳輸。勵磁設備通常含有多餘的設計和其它特色，可確保電的導通性，與保持推進力控制的重要性一致。

不常使用感應馬達是因為在典型海事推進裝置的較高功率範圍裡，同步機器提供了效率的優勢。

在同步交流馬達設計，所需的功率因素是由供電給機器的功率轉換器類型來決定。負載轉換換流器需要可供應超前功率因素的馬達，以提供足夠的電壓來轉

換換流器。這些馬達典型的額定值為0.9超前功率因素。在馬達設計上，0.9超前功率因素的影響是會增加機器必須處理的電流，而這相較於相同頻率和額定值的1.0功率因素機器，會造成馬達稍微加大。變頻器和脈寬調變換流器並不是靠馬達電壓與功率轉換器轉換，而且是為1.0功率因素而設計的。

馬達的轉速和功率頻率會有以下的關係：

$$n = 120 f / p$$

其中

n = 馬達轉速，rpm

f = 功率頻率，Hz

p = 馬達的極數（2的倍數）

由於CCV的輸出頻率在60-Hz功率系統上有一個約為20 Hz的實際上限，所以與CCV一起使用的馬達是屬於直接驅動式。與LCI一起使用的馬達通常是為40至60 Hz而設計的，而且可能是直接驅動或是透過一個減速齒輪來驅動。

圖15是單一電樞馬達設計的大約尺寸，與CCV靜態功率轉換器一起使用。用於CCV服務的馬達是為頻率20 Hz及以下而設計的，而LCI馬達則通常是為頻率40 Hz以上而設計的；因此，針對相同的功率和轉速，其馬達尺寸會有稍微的不同。圖15也說明單一電樞100-rpm、40-Hz馬達設計的大約尺寸，與LCI靜態功率轉換器一起使用。

透過減速齒輪驅動螺旋槳軸的較高速馬達也可與LCI轉換器一起使用，並節省一些成本和重量。圖16是傳統配置齒輪馬達驅動裝置的大約尺寸。一個馬達與齒輪組合的長度比直接驅動馬達還長，不過，較窄的設備輪廓和較輕重量在某些船舶配置是有益的。

雖然將主推進止推軸承裝在其中一個交流馬達軸承蓋是有可能，但較高馬力的直接驅動馬達的大直徑可能難以在止推軸承基礎內提供足夠的剛性，來將螺旋槳推力傳輸到船的結構。基於這個理由，主止推軸承

通常是在馬達的尾端。止推軸承和馬達軸承使用類似的潤滑油，可以由同一個潤滑系統提供。

從最少成本和重量的觀點來看，單一電樞馬達必須使用於空間容許的地方。不過，雙電樞馬達則可使用於直徑受限或要求兩個獨立電路裝置有額外可靠度的地方。

閘流體單元損壞很少發生。真的發生時，幾乎都是因短路而損壞。因此，大部份交流轉換器都是以備用閘流體單元串聯連接，使能在全額定值時繼續操作，即使在損失一個單元的情況。

由於導體的實體配置，電纜或馬達繞組內的電路故障傾向本質為單相，這是在兩倍馬達操作頻率所產生扭力脈衝。軸系受到來自故障誘發扭力的勵磁期間可達到幾秒鐘，這隨著保護系統偵測和消除故障所需的時間長短而異。

由於馬達可以在寬廣的頻率範圍內操作，所以在某些操作頻率的故障會造成在一些頻率的扭力脈衝。透過軸系，這些頻率會被馬達與螺旋槳之間的機械共振放大。這需要對電機系統的仔細分析，才能確保軸系的設計正確。透過在關鍵轉速範圍操作時馬達勵磁的自動程式化以降低位準，透過馬達與軸系之間的能量吸收聯結器，透過避免在關鍵馬達轉速範圍裏的連續操作，或透過以上的組合，即可達到減輕的目的。🔧

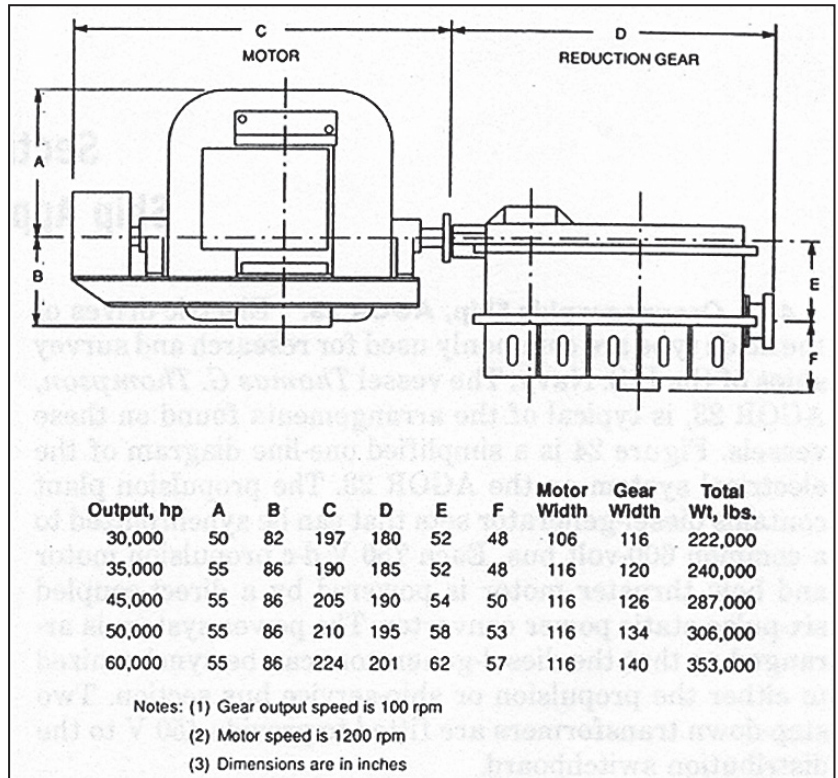


圖16 負載轉換換流器系統裏傳統配置的齒輪推進馬達的大約尺寸和重量

參考文獻

- 1 Power Converter Handbook: Theory, Design and Application, R. W. Lye, Ed., PCH Associates, Peterborough, Ont., 1976.
- 2 J. M. D. Murphy and F. G. Turnbull, Power Electronic Control of AC Motors, Pergamon Press, Oxford, U. K., 1988.
- 3 E. F. W. Alexanderson and A. H. Mittag, "The Thyatron Motor," Electrical Eng. (New York) Vol. 53, Nov. 1934.
- 4 L. Gyugyi and B. R. Pelly, Static Power Frequency Changers, John Wiley & Sons, New York, 1976.
- 5 W. A. Hill, R. A. Turton, R. J. Dungan, and C. L. Schwalm, "A Vector-Controlled Cycloconverter Drive for an Icebreaker," IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-23, No. 6, Nov./ Dec. 1987.
- 6 D. Peters and C. Vanzeyl, "Electric Propulsion Systems—The Way of the Future," 41st Annual Technical Conference, Canadian Maritime Industries Assn., Feb. 1989.
- 7 Roy L. Harrington, Marine Engineering, The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1992.