

發明專利說明書

※申請案號：098129022

※IPC分類：

一、發明名稱：

凸極無刷直流電機之再生煞車控制方法

二、中文發明摘要：

本發明係一種凸極無刷直流電機之再生煞車控制方法，依據無刷直流電機實際轉速與轉子位置資訊及提供之再生煞車強度，透過計算得到適當地控制信號，以控制反流器切換功率開關的對應切換模式，進而造成凸極無刷直流電機之轉子動能以較高轉換效率轉換為電能儲存。配合本發明方法之凸極無刷直流電機，其轉子動能以更高電能轉換效率轉換為電能，且於不同轉速時能適時採適當反流器功率開關切換模式來控制凸極無刷直流電機的運轉，藉以更高電能轉換效率進行再生煞車。

三、英文發明摘要：

四、指定代表圖：

(一)本案指定代表圖為：第五圖

(二)本代表圖之元件符號簡單說明：

五、本案若有化學式時，請揭示最能顯示發明特徵的化學式：

六、發明說明：

【發明所屬之技術領域】

[0001] 本發明係有關於一種無刷直流電機，特別是指一種磁場路徑具凸極分佈的無刷直流電機的再生煞車控制方法。

【先前技術】

[0002] 按，由於溫室效應日益嚴重的關係，造成氣象環境莫大改變，為了力抗溫室效應，故有眾多車輛產業在近幾年投入其他乾淨能源的開發，以期能大幅降低燃油車輛的二氧化碳排放量，其中又以電動車輛的發展最受矚目，因此如何開發高能源效率之電動機也成極其重要的議題之一。

[0003] 其中，永磁式旋轉電機因為其結構堅固，高效率，驅控容易以及價格趨於便宜等諸多優點，使其近年來大量被採用；而電動車輛的驅控系統除肩負驅動電動車之主要功能外，也必須包含煞車時將動能轉換為電能回充的再生煞車功能。習用磁路對稱分佈的無刷直流電機，其再生煞車控制方法係藉由所偵測的轉子位置辨別出對應的繞組反電勢波形，再選擇對應的反流器開關切換模式，依此切換模式會使電機產生與繞組反電勢反相的繞組電流，根據電學基本原理推知，此即開始電機繞組的發電機制，也就是所謂的再生煞車機制，典型文獻參考如1992年七月IEEE Transactions on Industry Applications期刊論文“Four Quadrant Brushless ECM Drive with Integrated Current Regulation”，而其理想再生煞車控制波形，就如第一圖之習知磁路對稱無刷直流電機的再生煞車控制波形圖所示，可見理想A相反電勢電壓 e_{An} 波形及反流器6個功率開關的切換模式之關係，且此切換模式所獲得無刷直流電機之繞組電流與繞組反電勢相差接近 180° 。

[0004] 然而，另一種磁場路徑具凸極分佈的無刷直流電機，其較高電能轉換效率的再生煞車控制方法與習知磁路對稱分佈無刷直流電機的再生煞車控制方法不同，其最近文獻參考如2008年元月IEEE Transactions on Industrial Electronics期刊論文“Voltage Constraint Tracking Based Field Weakening Control of IPM Synchronous Motor Drives”闡述的有關凸極永磁同步電動機運轉於再生煞車模式的控制學理基礎。但關於此技術應用於凸極無刷直流電機之相關深入開發卻仍不多見，因此現有產品與學理基礎間之效率仍存有一大差距。

[0005] 有鑑於此，本發明乃基於文獻“Voltage Constraint Tracking Based Field Weakening Control of IPM Synchronous Motor Drives”闡述之凸極永磁同步電機的再生煞車運轉基本原理，將之應用於凸極無刷直流電機之再生煞車控制，而發展出本發明方法。

【發明內容】

[0006] 本發明之主要目的係在提供一種凸極無刷直流電機之再生煞車控制方法，主要是依照所需求的再生煞車強度配合轉速以及轉子位置資訊決定適當的落後切換相角，使所選擇的反流器功率開關的切換模式依照前述的落後切換相角進行切換，以發揮近似學理的高效率再生煞車效能。

[0007] 為達到上述之目的，本發明凸極無刷直流電機之再生煞車控制方法係提供一反流器，並以反流器之功率開關控制一凸極無刷直流電機運轉，且該凸極無刷直流電機之特性原具有一額定轉速，並經指定而具有一臨界轉速、一最大落後切換相角、一額定再生煞車強度、一再生煞車強度；首先偵測凸極無刷直流電機之轉子位置，並取得其轉子位置信號，接著，以轉子位置信號獲得凸極無刷直流電機之轉子區域、轉子角度以及轉速等參數，並取該轉速與凸極無刷直流電機之最大落後切換相角、額定再生煞車強度、再生煞車強度以及

額定轉速之關係判斷得到一落後切換相角，再利用此落後切換相角與轉子區域以及轉子角度之關係判斷得到一控制信號，以此控制信號操控反流器之功率開關動作，藉以將其轉子動能轉換為電能而送到一電能儲存單元中儲存。

[0008] 底下藉由具體實施例配合所附圖式詳加說明，當更容易瞭解本發明之目的、技術內容、特點及其所達成之功效。

【實施方式】

[0009] 請參照第二圖，係藉以實現本發明方法之一凸極無刷直流電機之再生煞車系統示意圖。如圖示之系統100，其包括一電能儲存單元11、一反流器12、一凸極無刷直流電機13、一轉子位置感測器14、一機械負載15以及一數位化反流器控制裝置16。其中電能儲存單元11常見者係為蓄電池，其為電能雙向傳輸者，可以輸出電能作為動力源或者接受回流電能儲存備用。反流器12電連接電能儲存單元11再電連接到凸極無刷直流電機13，且就如第三圖所示，反流器12為一三相全橋反流器，其內具有六個功率開關S1、S2、S3、S4、S5與S6，每一功率開關S1、S2、S3、S4、S5與S6都包括一功率電晶體與一電連接的背接二極體，反流器12透過開關S1至S6可控制電能儲存單元11與凸極無刷直流電機13間的電能傳輸方向，換言之，切換功率開關S1至S6可以導出電能儲存單元11之電能，進而驅動凸極無刷直流電機13運轉，此利用反流器12驅動電機13運轉之操作模式稱為電動機驅動模式；反之，逆向操作功率開關S1至S6，能驅使凸極無刷直流電機13的轉子將其動能轉換為電能，再輸回到電能儲存單元11中儲存，此種電能送到電能儲存單元11儲能之操作模式被稱之為發電模式或稱之再生煞車模式。

[0010] 回到第二圖，凸極無刷直流電機13之輸出軸連接機械負載15，藉以負責供給機械負載15動力源，本系統100再以轉子位置感測器14裝設在電機13上，透過其中的感測機制檢知電機13之轉子位置，該轉子位置感測器14於本實施中主要係由三個霍爾感測器組成，透過偵測電機13之轉子磁石與定子繞組的相對位置而輸出三個轉子位置信號u、v、w；當然，除了前述利用霍爾感測器偵測電機轉子位置之方式外，以現有技術而言，熟知該項技藝者尚能利用多種可提供電機轉子位置信號之相似感測機制達到相同目的，也因此，具相等效益之成品應都是為本發明之等效實施。其次，數位化反流器控制裝置16電性連接於轉子位置感測器14以及反流器12間，該數位化反流器控制裝置16內具有一轉子區域位置偵測單元161、一轉速計算單元162以及一控制信號產生單元163；其中，轉子區域位置偵測單元161電連接轉子位置感測器14，以接收轉子位置信號u、v、w來辨識及估測一轉子區域以及一轉子角度 θ_r ，參數給予控制信號產生單元163；同樣地，轉速計算單元162電連接轉子位置感測器14，以接收轉子位置信號u、v、w來計算電機13轉子之轉速 ω_r ；另由外部提供控制信號產生單元163一再生煞車強度 R^* 參數，控制信號產生單元163接收此再生煞車強度 R^* 、轉子角度 θ_r 、轉子區域以及轉速 ω_r 後，將計算一落後切換相角 $thlag$ ，並根據落後切換相角、轉子角度 θ_r 以及轉子區域間之關係計算得到一控制信號，由此控制信號控制反流器12六個功率開關作動。且該數位化反流器控制裝置16是透過數位化方式實現，可採任何市售的單晶片微處理器、數位信號處理器、可規劃邏輯陣列、各種形式電腦或其他相似功能的數位化處理器等。

[0011] 再者，根據學理的結論，凸極無刷直流電機於低速運轉時，電機繞組具有較低反電勢，此時落後切換相角與再生煞車強度成正比例關係；反之，凸極無刷直流電機於高速運轉時，電機繞組具有較高反電勢，此時落後切換相角與轉速以及再生煞車強度兩者之關係成正比。

[0012] 因此本發明之方法也依此機制而開發，在電機繞組由低速到高速，落後切換相角由小到大，或是當低再生煞車需求到高再生煞車需求時，落後切換相角也會由小到大之關係進行再生煞車控制，藉此機制實行之控制方法即會符合學理結論。除此之外，本發明之方法由數位化反流器控制裝置16根據電機13基本特性控制反流器12所有功率開關之動作，因此建立本方法前，必須先將電機13特性輸入數位化反流器控制裝置16內，而所謂的電機13特性包括有該電機13之最大落後切換相角 $thlag_{max}$ 、額定再生煞車強度 R_{base} 、再生煞車強度 R^* 、臨界轉速 ω_{rth} 以及額定轉速 ω_{rbase} 等參數。

[0013] 詳言之，本發明凸極無刷直流電機之再生煞車控制方法如第四圖所示，程式開始後，如步驟S10所示，由轉子位置感測器14取得轉子位置信號u、v、w；再接著於步驟S20所示，以輸入的轉子位置信號判斷轉子位置資訊，其中，由轉子區域位置偵測單元161取得轉子區域以及轉子角度 θ_r 二參數，以及由轉速計算單元162取得轉速 ω_r 參數；接著如步驟S30所示，計算需求的反流器12功率開關之落後切換相角 $thlag$ 。請同時參照第五圖，在步驟S31中，控制信號產生單元163取輸入的臨界轉速 ω_{rth} 與計算得到的電機13轉速 ω_r 進行判斷，並設定轉速 ω_r 小於臨界轉速 ω_{rth} 時進行步驟S32，反之，當轉速 ω_r 大於或等於臨界轉速 ω_{rth} 時進行步驟S33及S34；若是步驟S31判斷轉速 ω_r 小於臨界轉速 ω_{rth} ，當利用最大落後切換相角 $thlag_{max}$ 、額定再生煞車強度 R_{base} 以及再生煞車強度 R^* 計算該落後切換相角 $thlag$ ，其公式(1)並如下所示：

$$[0014] \quad thlag = \left(\frac{thlag_{max}}{R_{base}} \right) R^* \quad (1);$$

[0015] 此外，在步驟S31中，若判斷轉速 ω_r 大於或等於臨界轉速 ω_{rth} ，則接著進行步驟S33，利用最大落後切換相角 $thlag_{max}$ 、額定再生煞車強度 R_{base} 以及再生煞車強度 R^* 計算一第一暫時相角 $thlag_1$ ，其公式(2)如下所示：

[0016]

$$thlag_1 = \left(\frac{thlag_{max}}{R_{base}} \right) R \quad (2);$$

[0017] 且利用最大落後切換相角 $thlag_{max}$ 、轉速 ω_r 以及電機13之額定轉速 ω_{rbase} 計算一第二暫時相角 $thlag_2$ ，其如公式(3)所示：

$$thlag_2 = \left(\frac{thlag_{max}}{\omega_{rbase}} \right) \omega_r \quad (3);$$

[0019] 藉由將公式(2)取得的第一暫時相角 $thlag_1$ 以及公式(3)取得的第二暫時相角 $thlag_2$ 相加，一樣可以獲得控制反流器12功率開關需要的落後切換相角 $thlag$ ，其公式(4)如下：

$$thadv = thadv_1 + thadv_2 \quad (4);$$

[0021] 在結束步驟S30以後，請參閱步驟S40，將計算得到的落後切換相角 $thlag$ 與最大落後切換相角 $thlag_{max}$ 進行大小之比較，並且設定落後切換相角 $thlag$ 大於最大落後切換相角 $thlag_{max}$ 時，進行步驟S50，也就是將落後切換相角 $thlag$ 限制為最大落後切換相角 $thlag_{max}$ ，並緊接著進行步驟S60；倘若步驟S40判斷落後切換相角 $thlag$ 小於或等於最大落後切換相角 $thlag_{max}$ ，此時則是將先前計算得到的落後切換相角 $thlag$ 直接送到步驟S60中。最後在步驟S60中，根據計算得之落後切換相角 $thlag$ ，配合轉子區域及轉子角度 θ_r 選擇功率開關切換模式，再透過數位化反流器控制裝置16的硬體介面電路送出控制信號控制反流器12來產生再生煞車作用，且步驟S60執行結束後程式將重返主程式，以上的實施流程至此為止是一個週期結束，等待下一個週期開始時，主程式將程式執行路徑重新載入步驟S10。

[0022] 依據本切換模式產生的效果能夠有效地將凸極無刷直流電機的動能透過電磁功率與磁阻功率的轉換而儲存，以藉此循環流程而達較佳控制凸極無刷直流電機再生煞車的效能，本發明使用之反流器六個功率開關與理想A項反電勢電壓 e_{An} 波形如第六圖所示，顯示本發明利用切換相角落後再生煞車之方法，在切換相角落後 15° 時的示意圖，以此切換模式所獲得無刷直流電機之繞組電流所超前繞組反電勢之相角低於 180° 。此外，依本發明方法驅動之凸極無刷直流電機之特性如第七圖所示，圖中顯示電機繞組之A相反電勢電壓 e_{An} ，參考基準由 0° 至 360° 一週期電氣角度，以及以 60° 為一區域單位的六個轉子區域分割圖，據此可瞭解A相反電勢電壓 e_{An} 與轉子位置信號 u 波形相對位置。

[0023] 再以一實際實施例及兩個代表性實驗結果驗證本發明之優點，本實施例係依照第二圖建立一凸極無刷直流電機再生煞車裝置，並設定一四極凸極無刷直流電機13之額定電壓是48V，額定功率是800W，額定轉速4500rev/min，電能儲存單元11採用48V至55V蓄電池組，數位化反流器控制裝置16為一商用數位信號處理器，實驗設定臨界轉速 ω_{rth} 是3500rev/min， $thlag_{max} = 30^\circ$ 。

[0024] 根據前述條件，再請參照第八圖所示採用習知再生煞車控制方法之實測響應波形實驗結果圖，顯示電機在轉速6240rev/min之高速時，開始進入再生煞車模式，信號 u 波形與A相反電勢電壓原為同相，而圖中所見A相電流波形 i_A 超前信號 u 波形約 180° ，表示A相電流波形 i_A 與A相反電勢電壓約相差 180° ，圖中同時顯示電能儲存單元的電流 i_{DC} 由0安培變為負值，顯示回充到蓄電池組的過程；再查第九圖所示，係採本發明方法之實驗結果圖，相似地顯示當電機轉速為6240rev/min高速時，電機開始進入再生煞車模式，相同地，在第九圖中信號 u 波形與A相反電勢電壓為同相，且圖中所見A相電流波形 i_A 乃超前信號 u 波形大約 150° ，此一結果在學理上就是表示，此時是屬於高速之再生煞車情況，所計算得之 $thlag$ 接近最大值 $thlag_{max}$ ，使得透過本方法能夠產生的電流向量落後於繞組反電勢的負值(反相)的相位約為 $thlag_{max}$ ，此時電流向量之直軸電流成分為負值，產生了磁阻轉矩的電能轉換，以達到相似於凸極永磁同步電機較佳的電能轉換效果；另外，第九圖中還同時顯示電能儲存單元的電流 i_{DC} 波形由0安培變為負值，顯示回充到蓄電池組的過程。

[0025] 比較第八圖及第九圖所示之結果，足以發現運用本發明之方法時，電能儲存單元之電流 i_{DC} 在再生煞車階段的電流平均值以及電流峰對峰值都比第八圖裡的相對應部份還小，換言之，本發明方法較習用方法在相同條件下能產生更多再生電能，且再生煞車過程的電流變動量較為和緩，亦顯示再生煞車的能量回充過程較習用方法更加平順。

[0026] 以上所述之實施例僅係為說明本發明之技術思想及特點，其目的在使熟習此項技藝之人士能夠瞭解本發明之內容並據以實施，當不能以之限定本發明之專利範圍，即大凡依本發明所揭示之精神所作之均等變化或修飾，仍應涵蓋在本發明之專利範圍內。

【圖式簡單說明】

[0038] 第一圖為習知反流器之6個功率開關再生煞車切換模式以及理想A相反電勢電壓 e_{An} 波形示意圖。

[0039] 第二圖為用以實現本發明方法之再生煞車控制裝置之系統架構圖。

[0040] 第三圖為本發明使用之反流器結構示意圖。

[0041] 第四圖為本發明再生煞車控制方法之流程圖。

[0042] 第五圖為本發明方法中計算落後切換相角之流程圖。

[0043] 第六圖為本發明方法在落後切換相角為 15° 時，再生煞車切換模式示意圖。

[0044] 第七圖為採用本發明方法的凸極無刷直流電機A相反電勢 e_{An} 與轉子位置信號 u 波形相對位置圖。

- [0045] 第八圖為採習知再生煞車控制方法之實測響應波形圖。
- [0046] 第九圖為採本發明再生煞車控制方法之實測響應波形圖。

【主要元件符號說明】

- [0027] 100 . . . 系統
- [0028] 11 . . . 電能儲存單元
- [0029] 12 . . . 反流器
- [0030] S1、S2、S3、S4、S5、S6 . . . 功率開關
- [0031] 13 . . . 凸極無刷直流電機
- [0032] 14 . . . 轉子位置感測器
- [0033] 15 . . . 機械負載
- [0034] 16 . . . 數位化反流器控制裝置
- [0035] 161 . . . 轉子區域位置偵測單元
- [0036] 162 . . . 轉速計算單元
- [0037] 163 . . . 控制信號產生單元

七、申請專利範圍：

1. 一種凸極無刷直流電機之再生煞車控制方法，用以控制一凸極無刷直流電機運轉，該凸極無刷直流電機具有一額定轉速，並經指定一臨界轉速、一最大落後切換相角、一額定再生煞車強度、一再生煞車強度；該再生煞車控制方法包括以下步驟：由一轉子位置偵測器偵測該凸極無刷直流電機之轉子位置，並發出至少一轉子位置信號；由一轉子區域位置偵測單元根據該轉子位置信號取得該凸極無刷直流電機之一轉子區域、一轉子角度以及一轉速計算單元電連接該轉子位置偵測器，用以偵測該凸極無刷直流電機之一轉速；一控制信號產生單元根據該最大落後切換相角、該額定再生煞車強度、該再生煞車強度以及該轉速與該額定轉速之關係判斷得到一落後切換相角；以及由該控制信號產生單元再根據該落後切換相角、該轉子區域以及該轉子角度之關係以判斷得到一控制信號，利用該控制信號操控一反流器，且該反流器電連接一電能儲存單元及電連接該凸極無刷直流電機，以驅控該凸極無刷直流電機，將其轉子動能轉換為電能而儲存於該電能儲存單元。
2. 如申請專利範圍第1項所述凸極無刷直流電機之再生煞車控制方法，其中得到該落後切換相角之步驟中，當該轉速低於該臨界轉速時，即取該最大落後切換相角、該額定再生煞車強度以及該再生煞車強度之關係計算該落後切換相角；以及在該轉速等於或高於該臨界轉速時，即取該最大落後切換相角、該額定再生煞車強度、該再生煞車強度之關係計算一第一暫時相角，並取該最大落後切換相角、該轉速以及該額定轉速計算一第二暫時相角，以相加該第一暫時相角以及該第二暫時相角得到該落後切換相角。
3. 如申請專利範圍第2項所述凸極無刷直流電機之再生煞車控制方法，當該轉速低於該臨界轉速時，該落後切換相角 $thlag$ 與該最大落後切換相角 $thlag_{max}$ 、該額定再生煞車強度 R_{base} 以及該再生煞車強度 R^* 之關係式

$$thlag = \left(\frac{thlag_{max}}{R_{base}} \right) R^* \text{。}$$

為：

4. 如申請專利範圍第2項所述凸極無刷直流電機之再生煞車控制方法，在該轉速等於或高於該臨界轉速時，其中該第一暫時相角 $thlag_1$ 與該最大落後切換相角 $thlag_{max}$ 、該額定再生煞車強度 R_{base} 以及該再生煞車強度 R^* 之關係式

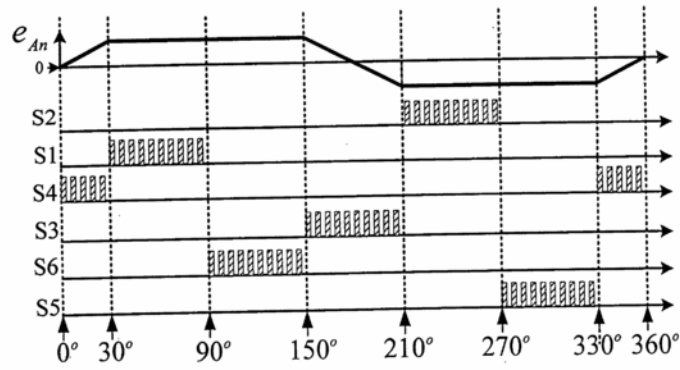
$$thlag_1 = \left(\frac{thlag_{max}}{R_{base}} \right) R^* \quad ; \text{ 以及}$$

為：
 $thlag_2$ 與該最大落後切換相角 $thlag_{max}$ 、該轉速 ω_r 以及該額定轉速 ω_{rbase} 之關係式

$$thlag_2 = \left(\frac{thlag_{max}}{\omega_{rbase}} \right) \omega_r \text{。}$$

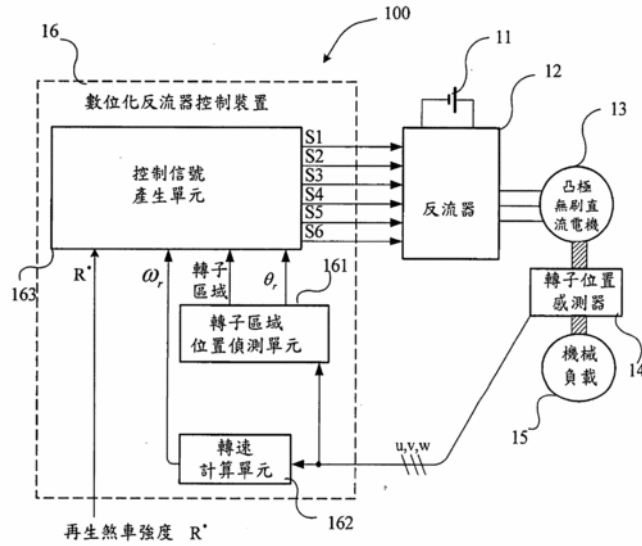
為：

八、圖式：



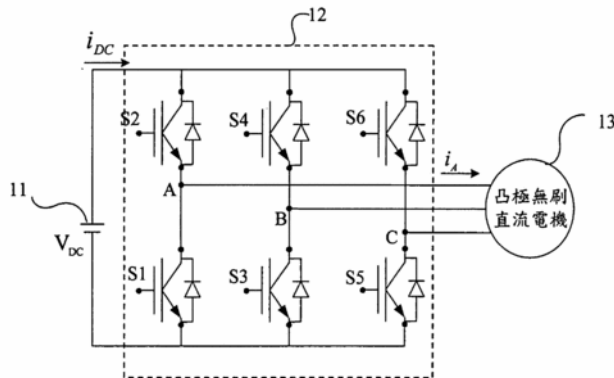
第一圖

第一圖



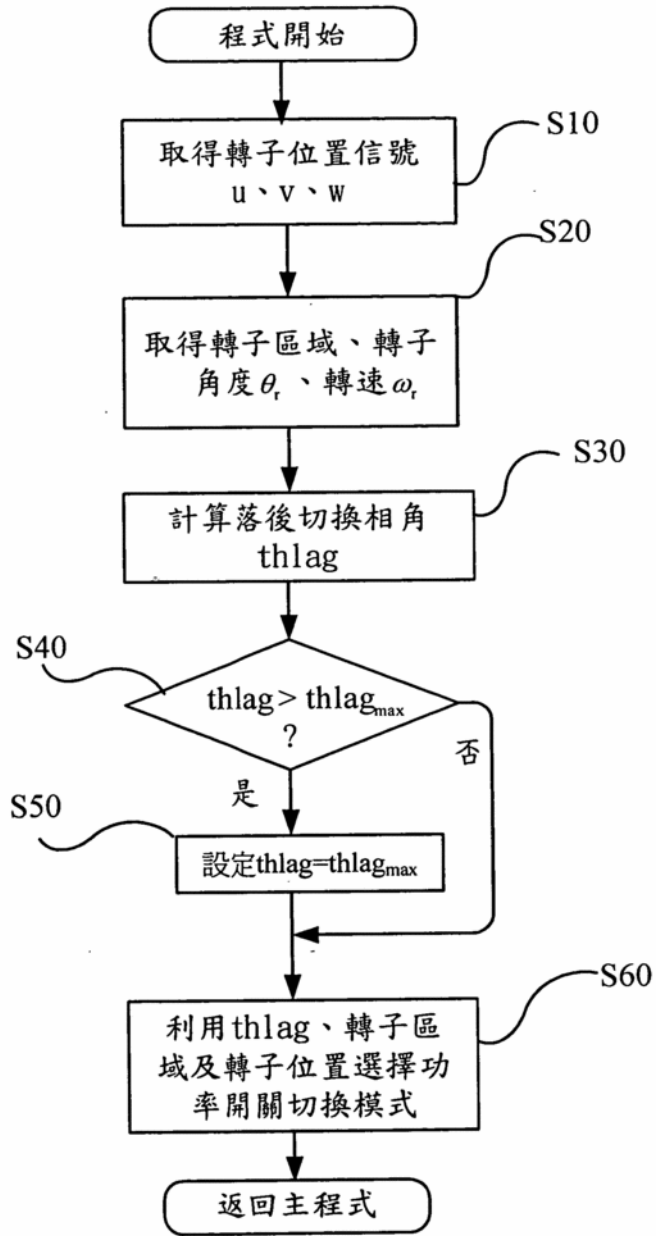
第二圖

第二圖



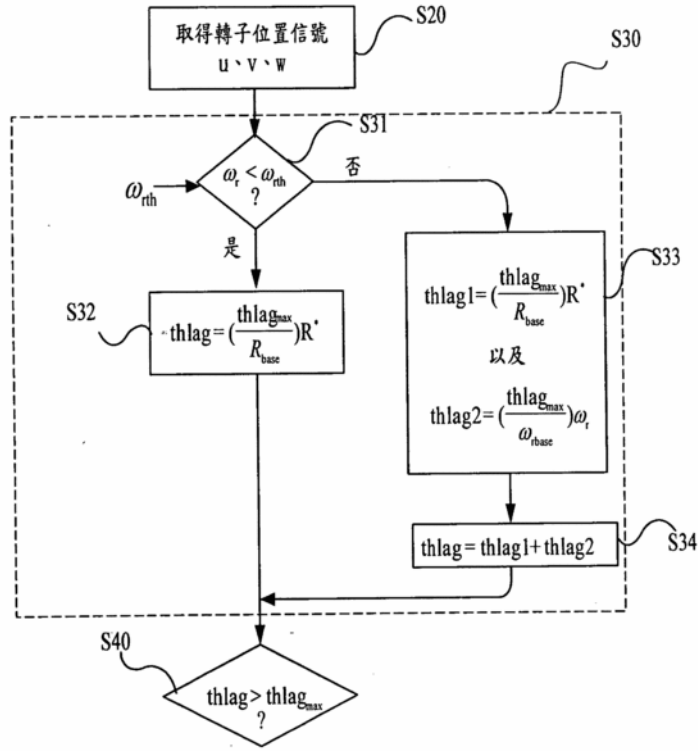
第三圖

第三圖



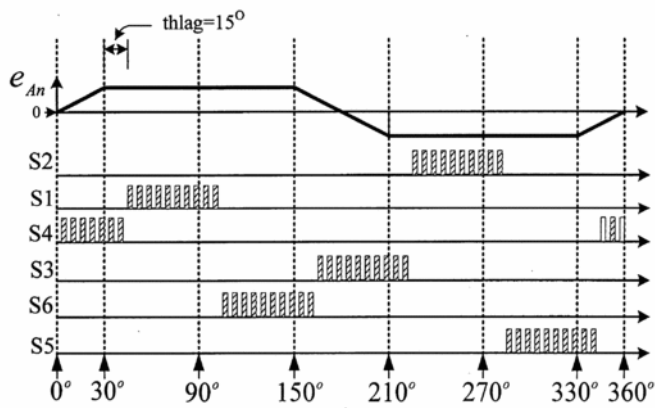
第四圖

第四圖



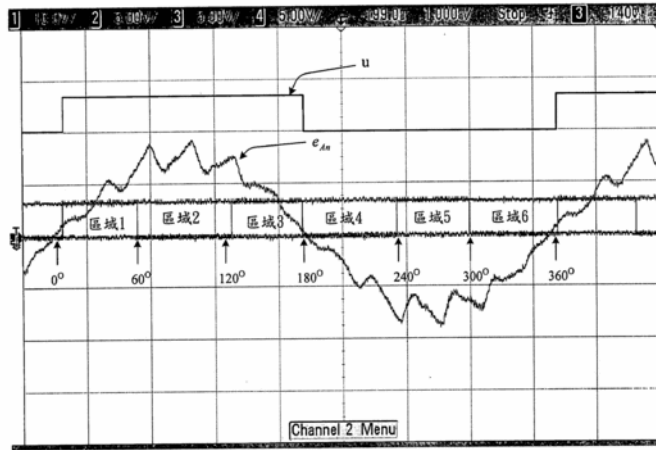
第五圖

第五圖



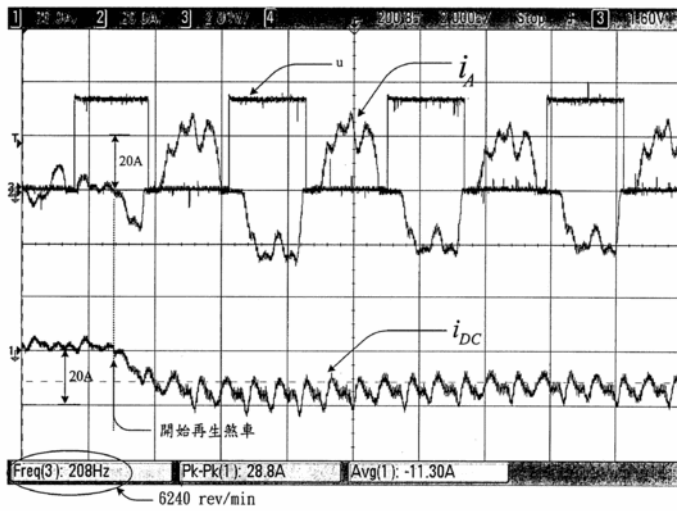
第六圖

第六圖



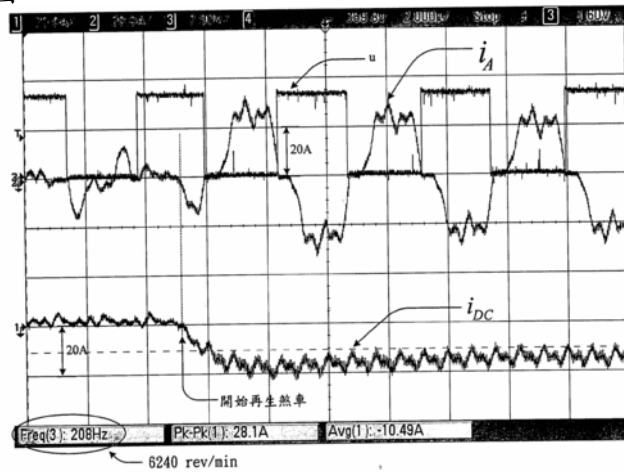
第七圖

第七圖



第八圖

第八圖



第九圖

第九圖