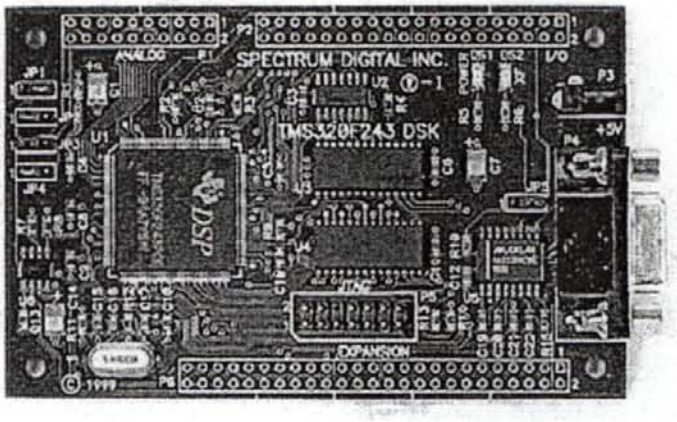
บทที่ 5 การเขียนโปรแกรม

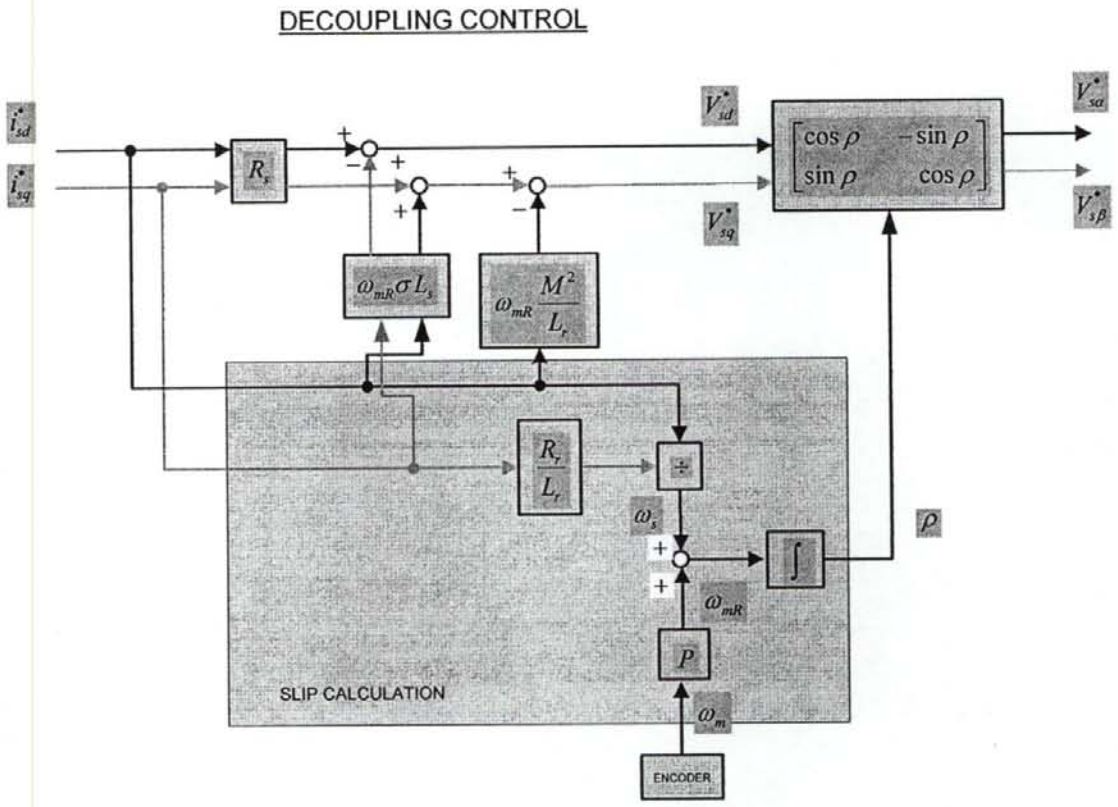
เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการเขียนโปรแกรมการระบบควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส แบบปรับความเร็ว จะทำการเขียนโปรแกรมโดยใช้ภาษาแอสเซมบลี ในการเขียนโปรแกรมในคอมพิวเตอร์ จากนั้นจะทำการโหลดโปรแกรมเข้าตัว DSP รุ่น TMS320F243 ดังรูปที่ 5.1 แต่ก่อนจะการเขียนโปรแกรม จะต้องการแปลงสมการต่างๆที่จะเขียนโปรแกรมให้อยู่ในรูปของสมการแบบดีสครีตเสียก่อน โดยจะอธิบายเป็นหัวข้อดังนี้



รูปที่ 5.1 แสดงรูป DSP รุ่น TMS 320F243

5.1 สมการดีสครีต (Discrete time equation)

พิจารณาสมการที่ใช้ในการแปลงเป็นสมการในรูปดีสครีต ดังนี้สมการต่อไปนี้โดยจะใช้บล็อกการควบคุมการควบคุมมอเตอร์แบบปรับความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยทำการปรับแรงดันและความถี่โดยใช้วิธีการแบบแยกการเชื่อมร่วม



รูปที่ 5.2 แสดงบล็อกการควบคุมแบบแยกการเชื่อมร่วม

สมการ Speed regulator :

$$i_{sq}^* = \left(k_{p\omega} + k_{i\omega}\int dt\right)\left(\omega_m^* - \omega_m\right) \tag{5.1}$$

สมการ Slip/Rotor flux angle calculation

เมื่อ

$$\hat{\omega}_s = \frac{R_r}{L_r}\frac{i_{sq}^*}{i_{sd}^*} \tag{5.2}$$

และจะได้สมการหาค่ามุมโรเตอร์ฟลักซ์ดังสมการที่ 5.3

$$\frac{d\rho}{dt} = \omega_{mR} = p\omega_m + \hat{\omega}_s = p\omega_m + \frac{R_r}{L_r}\frac{i_{sq}^*}{i_{sd}^*} \tag{5.3}$$

สมการแรงดัน Decupling control: แสดงดังสมการที่ 5.4 - 5.5 ซึ่งเป็นสมการแรงดันจากบทที่ 2

$$V_{sd}^{*} = R_s i_{sd}^{*} - \omega_{mR}\sigma L_s i_{sq}^{*} \tag{5.4}$$

$$V_{sq}^{*} = R_s i_{sq}^{*} + \left(\sigma L_s + \frac{M^2}{L_r}\right)\omega_{mR} i_{sd}^{*} \tag{5.5}$$

5.2 สมการดีสครีต (Discrete Equations)

เมื่อทำการแปลงสมการ 5.1 เป็นสมการดีสครีตจะใช้หลักการแปลงสมการอินติเกรตดังสมการที่ 5.6 - 5.7 และ จะได้สมการที่ 5.8

$$\frac{dx}{dt} \approx \frac{x_{(k)} - x_{(k-1)}}{T} \tag{5.6}$$

$$\int_0^{kT} x dt \approx \left(\sum_{i=1}^{k} x_i\right).T \tag{5.7}$$

$$i_{sq(k)}^{*} = \left[\omega_{m(k)}^{*} - \omega_{m(k)}\right]k_{p\omega} + k_{i\omega}.T\left[\sum_{i=1}^{k}\left(\omega_{m(i)}^{*} - \omega_{m(i)}\right)\right] \tag{5.8}$$

สมการ Slip/Rotor flux angle calculation

จากสมการที่ 5.2 เมื่อแปลงเป็นสมการดีสครีตจะได้สมการที่ 5.9

$$\hat{\omega}_{s(k)} = \frac{R_r}{L_r}\frac{i_{sq(k)}^{*}}{i_{sd(k)}^{*}} \tag{5.9}$$

และในส่วนของสมการความเร็วโรเตอร์ฟลักซ์จะได้ดังสมการที่ 5.11

$$\frac{\rho_{(k)} - \rho_{(k-1)}}{T} = p\omega_{m(k)} + \frac{R_r}{L_r}\frac{i_{sq(k)}^{*}}{i_{sd(k)}^{*}} \tag{5.10}$$

จากสมการที่ 5.10 สามารถหาค่ามุมโรเตอร์ฟลักซ์ได้ดังสมการที่ 5.11

$$\rho_{(k)} = T.p\omega_{m(k)} + \frac{T.R_r}{L_r}\frac{i_{sq(k)}^{*}}{i_{sd(k)}^{*}} + \rho_{(k-1)} \tag{5.11}$$

สมการแรงดัน Decupling control: แสดงดังสมการที่ 5.4-5.5 เมื่อแปลงเป็นสมการดีสครีตสามารถแสดงดังสมการที่ 5.12 – 5.13 ตามลำดับ

$$V^{*}_{sd(k)} = R_s i^{*}_{sd(k)} - \omega_{mR}\sigma L_s i^{*}_{sq(k)} \tag{5.12}$$

$$V^{*}_{sq(k)} = R_s i^{*}_{sq(k)} + \left(\sigma L_s + \frac{M^2}{L_r}\right)\omega_{mR} i^{*}_{sd(k)} \tag{5.13}$$

5.3 ค่าหน่วย (Per-Unit Value)

เมื่อค่าหน่วยสามารถหาได้ดังสมการ 5.14

$$p.u. = \frac{real}{base} \tag{5.14}$$

เมื่อนำสมการที่ 5.8 แปลงเป็นสมการ p.u. มีค่าดังสมการที่ 5.15

$$I^{*}_{sq(k)} = \left[\Omega^{*}_{m(k)} - \Omega_{m(k)}\right]\frac{\omega_b.k_{p\omega}}{I_b} + \frac{\omega_b.k_{i\omega}}{I_b}.T\left[\sum_{i=1}^{k}\left(\Omega^{*}_{m(i)} - \Omega_{m(i)}\right)\right] \tag{5.15}$$

เมื่อ

$$\Omega^{*}_{m(k)} = \frac{\omega^{*}_{m(k)}}{\omega_b}$$

จากสมการที่ 5.9 เมื่อแปลงเป็นสมการ p.u. จะได้สมการที่ 5.16

$$\hat{\Omega}_{s(k)} = \frac{R_r}{\omega_b L_r}\frac{I^{*}_{sq(k)}}{I^{*}_{sd(k)}} \tag{5.16}$$

จากสมการที่ 5.11 สามารถหาค่ามุมโรเตอร์ฟลักซ์ได้ดังสมการที่ 5.17

$$\rho_{(k)} = \frac{T.p.\omega_b.\omega_{m(k)}}{\rho_b} + \frac{T.R_r}{\rho_b.L_r}\frac{I^{*}_{sq(k)}}{I^{*}_{sd(k)}} + \rho_{(k-1)} \tag{5.17}$$

สมการแรงดัน Decupling control:แสดงดังสมการที่ 5.12 – 5.13 เมื่อแปลงเป็นสมการ p.u. สามารถแสดงดังสมการที่ 5.18 – 5.19 ตามลำดับ

$$U^{*}_{sd(k)} = \frac{R_s.I_b.I^{*}_{sd(k)}}{V_b} - \frac{\omega_b.\Omega_{mR}.\sigma L_s.I_b.I^{*}_{sq(k)}}{V_b} \tag{5.18}$$

$$U^{*}_{sq(k)} = \frac{R_s.I_b.I^{*}_{sq(k)}}{V_b} + \frac{\omega_b.\Omega_{mR}.\sigma L_s.I_b.I^{*}_{sd(k)}}{V_b} + \frac{\omega_b.\Omega_{mR}.M^2.I_b.I^{*}_{sd(k)}}{V_b.L_r} \tag{5.19}$$

5.4 ค่าเบส (Base Value)

การเลือกค่าเบสมีความจำเป็นมากในการนำค่านี้ไปทำการสเกลลิ่งเพื่อเขียนโปรแกรม

<u>ค่าเบสกระแส</u>

$$I_b = \left(\sqrt{2}\right) i_s = \sqrt{2} \times 0.202 = 0.285\,A$$

<u>ค่าเบสแรงดัน</u>

$$V_b = \left(\sqrt{2}\right) i_s = \sqrt{2} \times 220 = 311.127\,V$$

<u>ค่าเบสอิมพิแดนท์</u>

$$Z_b = \frac{V_b}{I_b} = \frac{311.127}{0.285} = 1092\,\Omega$$

<u>ค่าเบสความเร็วเชิงมุม</u>

$$\omega_b = 2\pi f_b = 2 \times \pi \times 50 = 314\,rad/s$$

<u>ค่าเบสความเร็วโรเตอร์</u>

$$N_b = N_m = 1385\,rpm$$

<u>ค่าเบสฟลักซ์แม่เหล็กไฟฟ้า</u>

$$\psi_b = \frac{V_b}{\omega_b} = \frac{311.127}{314} = 0.99\,Wb$$

<u>ค่าเบสอินดักแตนท์</u>

$$L_b = \frac{\psi_b}{I_b} = \frac{0.99}{0.285} = 3.47\,H$$

5.5 ขั้นตอนการทำงานโปรแกรม

ในการเขียนโปรแกรมจะแสดงเฉพาะในส่วนของการทำงานโปรแกรมหลัก (Main Program) และรูปที่ 5.3 แสดงผังการทำงานของโปรแกรม

Decoupling Control of Three-phase Induction motor Drive

Module: Maine Program

Initialize

Initialize all variables and enable interrupt service routine

Loop here and wait for interrupt only

Interrupt Service Routine

Read DC bus voltage from A to D

Get speed command from Encoder

Calculate actual speed

Speed regulator

Calculate speed error

Calculate Speed Calculate output i_{sq}^{*}

Slip/Rotor flux angle calculation

Calculate slip $\hat{\omega}_s$

Calculate rotor flux frequency $\hat{\omega}_o$

Calculate rotor flux ρ

Decoupling Control

Calculate V_{sd}^{*}, V_{sq}^{*}

Calculate $V_{s\alpha}^{*}, V_{s\beta}^{*}$

Convert 3 phase voltage (V_{su}, V_{sv}, V_{sw})

Generate SVPWM signal

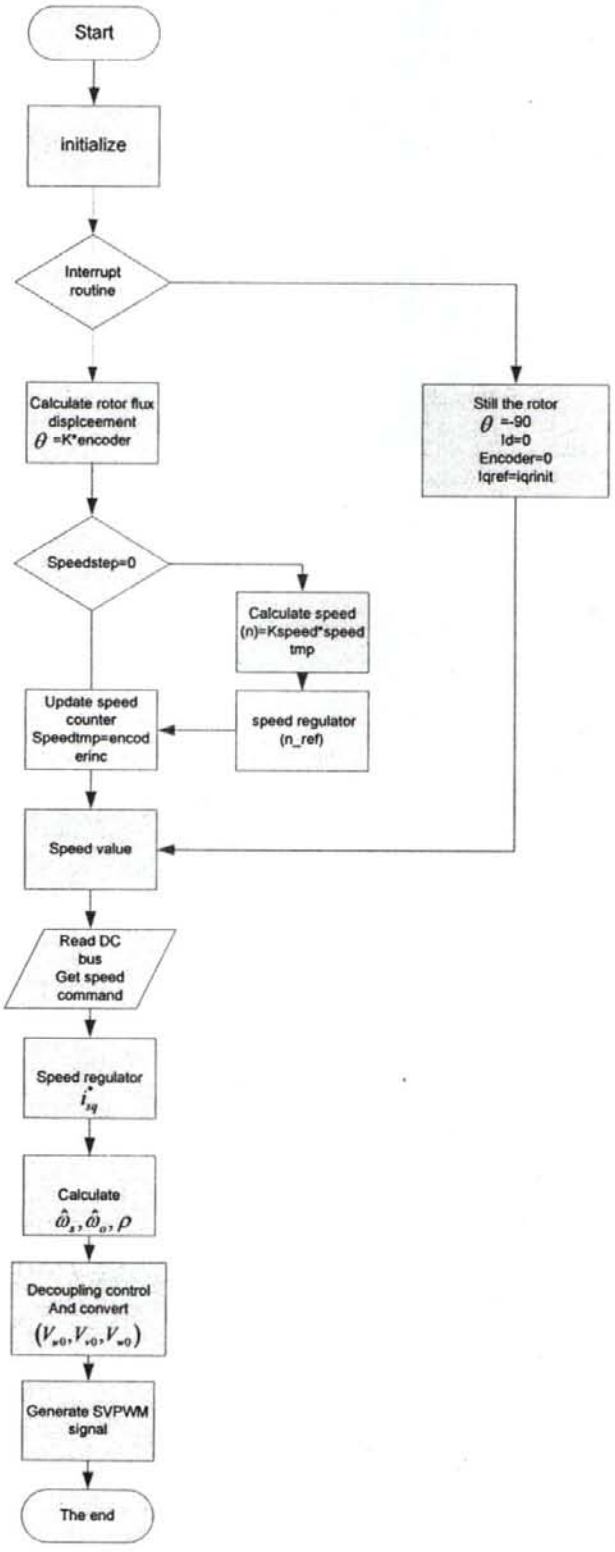
Calculate date-time compensated voltage

Calculate median voltage

Calculate voltage to compare carrier wave (V_{u0}, V_{v0}, V_{w0})

Return interrupt

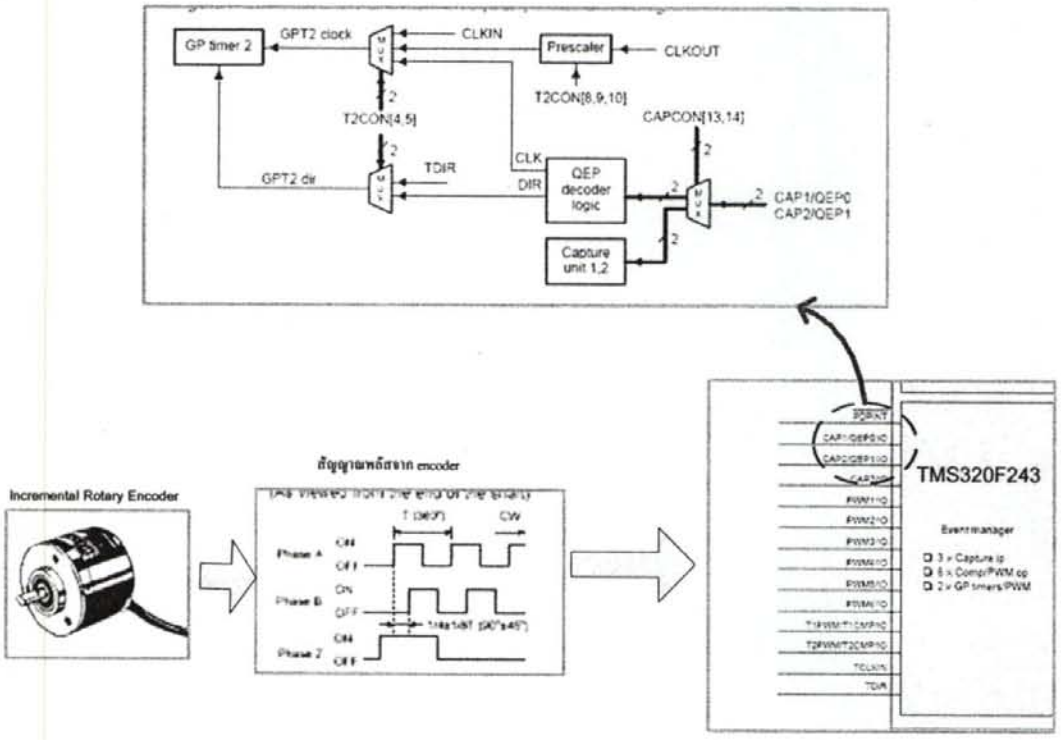
End of main program



รูปที่ 5.3 แสดงผังการทำงานหลักของโปรแกรม

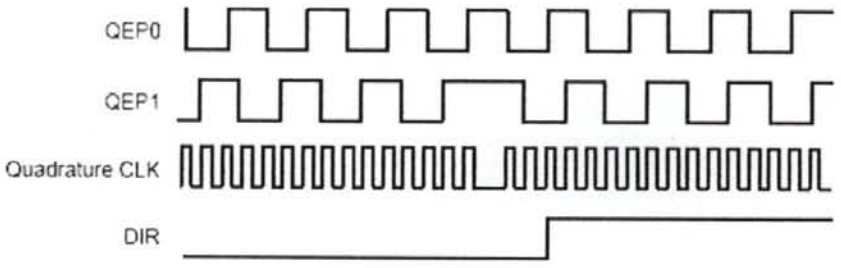
5.6 การเขียนโปรแกรมตรวจจับความเร็ว

การเขียนโปรแกรมในการวัดค่าความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ในการรับค่าความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ จะใช้ตัววัดความเร็วชนิด อินครีเมนท์ทอลโรตารี่เอ็นโคดเดอร์ (Incremental Rotary Encoder) ของออมรอนรุ่น E6C2-C ดังรูปที่ 5.4 แสดงระบบการตัวตรวจจับความเร็วจาก Incremental Rotary Encoder ที่เชื่อมต่อเข้ากับ DSP



รูปที่ 5.4 แสดงระบบการตัวตรวจจับความเร็วจาก Incremental Rotary Encoder

โดยที่จำนวนพลัสต่อรอบมีค่าเท่ากับ 1024 พลัส/รอบ และแรงดันที่จ่ายให้กับ Incremental Rotary Encoder ใช้แรงดัน 5 Vdc

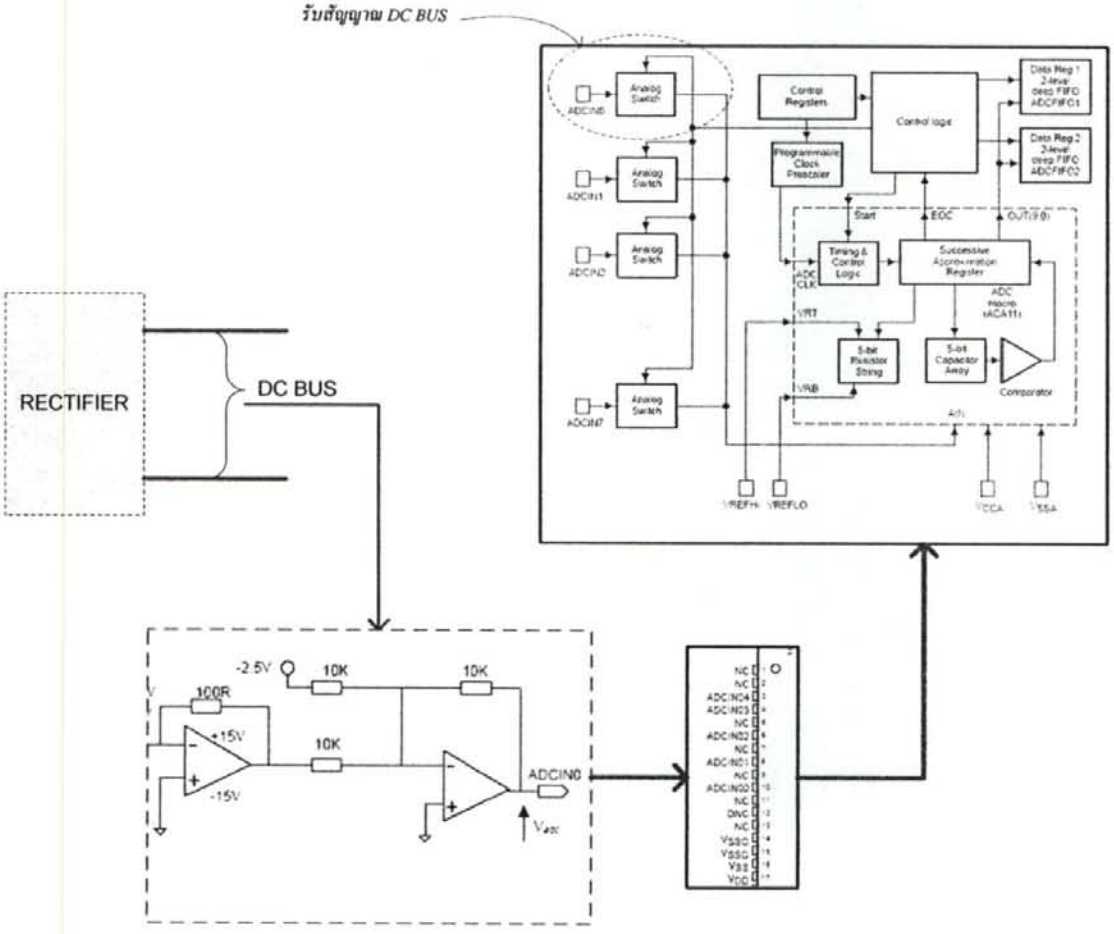


รูปที่ 5.5 แสดงสัญญาณ QEP0 และ QEP1

สัญญาณพลัสที่สร้างจาก QEP0 และ QEP1 แสดงดังรูปที่ 5.5 และจะต่างเฟสกัน 90 องศา ส่วนค่า DIR จะเป็นตัวเปรียบเทียบการกลับทิศทางการหมุนของความเร็วมอเตอร์ ในการใช้โหมดนี้ในการเขียนโปรแกรมจะต้องทำการเซตค่า GP timer 2 จะเป็นคาบเวลาที่ใช้ในการเปรียบเทียบและ T2CON เป็นโหมดในการนับทิศทางโดนพิจารณาการนับขึ้นหรือนับลง up/down – mode ที่จะต้องใช้สัญญาณนาฬิกาจากวงจร QEP แสดงดังรูปที่ 5.4

5.7 การรับค่าสัญญาณอนาลอก

ในการรับค่าสัญญาณอนาลอกที่จะใช้ในการเขียนโปรแกรมในงานวิจัยนี้เป็นการควบคุมการปรับความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ระบบการควบคุมจะต้องทาบข้อมูลของแรงดันบัสไฟตรงค่าแรงดันบัสไฟตรงจะเป็นสัญญาณอนาลอกที่จะส่งเข้าไปยัง DSP TMS320F243 ดังรูปที่ 5.6 โดยสัญญาณอนาลอกจะถูกส่งเข้าพอต ADC โดยในโหมดนี้สามารถแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอลมีความละเอียด 10 bit และการแปลงแสดงได้ดังสมการ ที่ 5.20

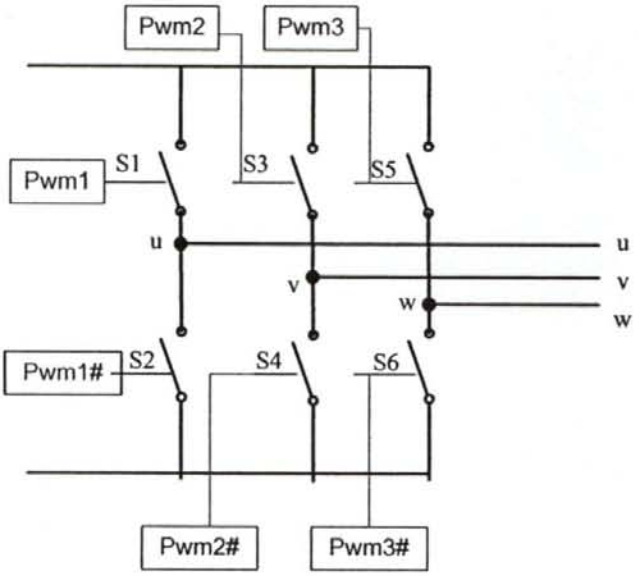


รูปที่ 5.6 แสดงการวัดค่าแรงดัน DC BUS เข้า ADC ของ DSP TMS320F243

$$Digital\ \mathrm{Re}sult = 1023 \times \frac{Input\ Voltage - Vref_{Lo}}{Vref_{Hi} - Vre_{Lo}} \tag{5.20}$$

5.7 การสร้างสัญญาณขับนำ

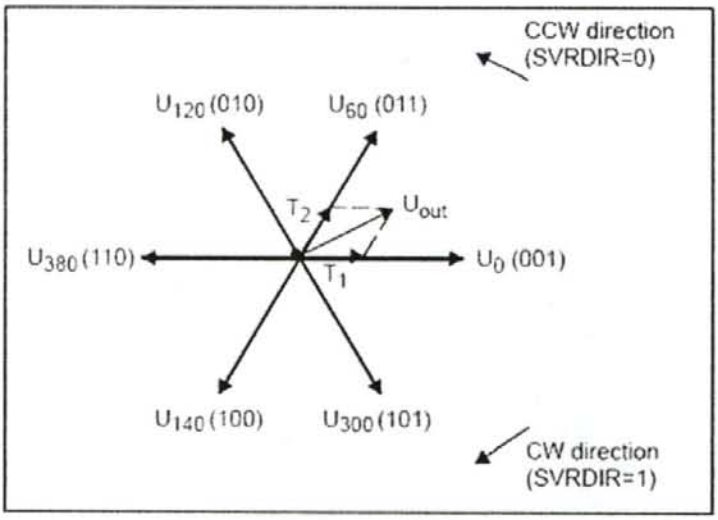
ในงานวิจัยนี้การสร้างสัญญาณขับนำจะใช้เทคนิคแบบ SVPWM (Space Vector PWM) ในการสั่งมอสเฟต 6 ตัวทำงานตามโปรแกรม โดยพิจารณาตามรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 การสร้างสัญญาณขับนำสวิตช์

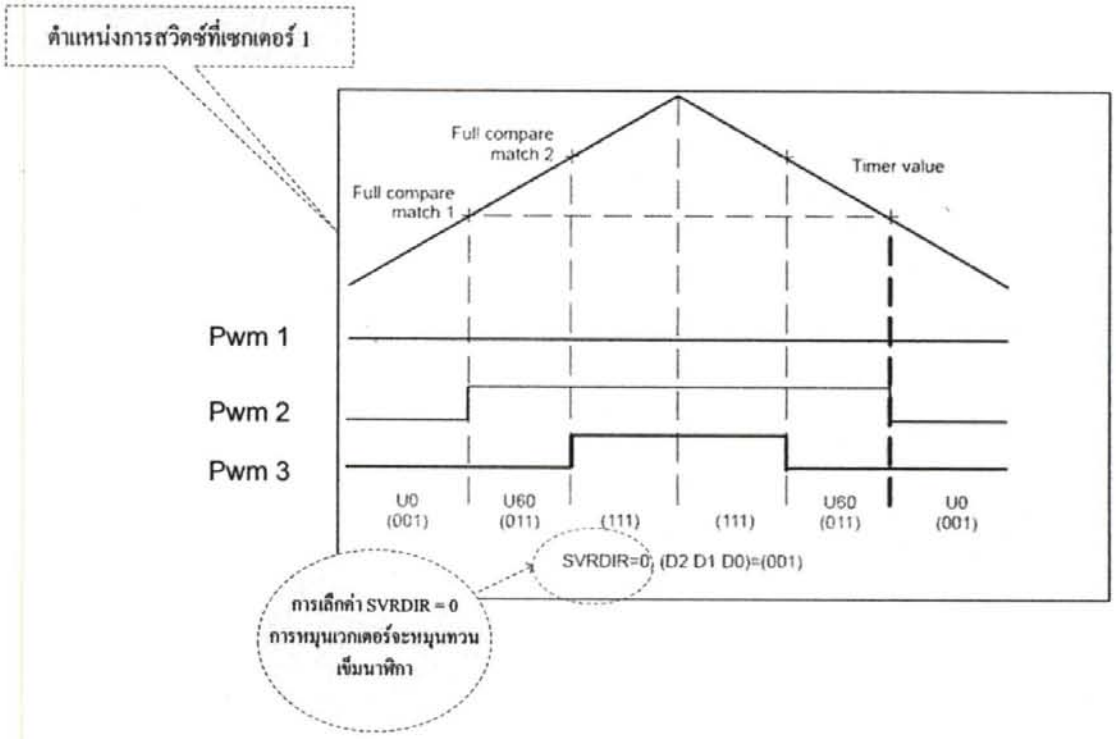
ในการเขียนโปรแกรมในการสร้างสัญญาณขับนำแบบ SVPWM จะต้องทำการเซตค่า ACTR, COMCON ให้ทำการเปรียบเทียบและเซตโหมด Space vector PWM และทำการเซตค่า CMPRx ให้เป็น underflow ด้วย โดยทำการเลือกค่า GP timer 1 ให้ทำการนับแบบต่อเนื่องโดยทำการนับแบบ up/down-mode

ในส่วนของการทำงานแบบ SVPWM จะมีการเลือกเซกเตอร์ในการสวิตช์โดยแรงดันที่ได้คือแรงดัน Uout ที่จะเป็นค่าแรงดันที่ใช้ในการขับนำสวิตช์ โดยจะมีเซกเตอร์ในการสวิตช์ถึง 6 เซกเตอร์แสดงดังรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.8 แสดงเซกเตอร์ในการสวิตซ์

การที่จะได้แรงดัน Uout จะต้องมีการคำนวณหาค่าเวลา T1, T2 และ T0

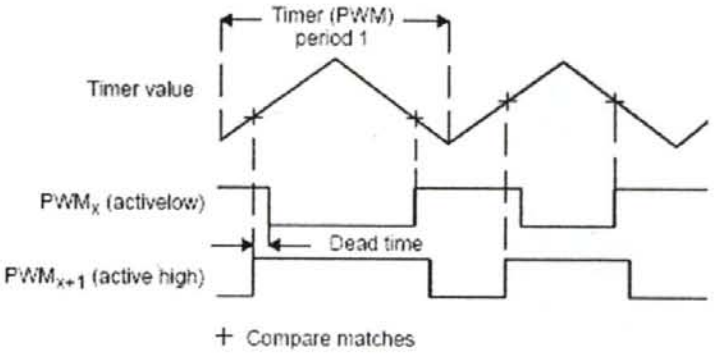


รูปที่ 5.9 แสดงการสร้างสัญญาณ PWM

จากรูปที่ 5.9 งานวิจัยนี้เลือกใช้การสวิตซ์แบบขอบขาคู่ (Double Edge) ที่มีสัญญาณเปรียบเทียบมีลักษณะที่เท่ากัน (Symmetric waveform generation) เมื่อค่าตัวนับมีค่ามากกว่าตัวเปรียบเทียบจะได้เอาต์พุตดังรูปที่ 5.10

ในการสร้างสัญญาณขับนำมอสเฟตของดีเอสพี F243 จะต้องทำการเซตค่าโปรแกรมในส่วนของ Even Manager register โดยทำการเซตค่าดังนี้

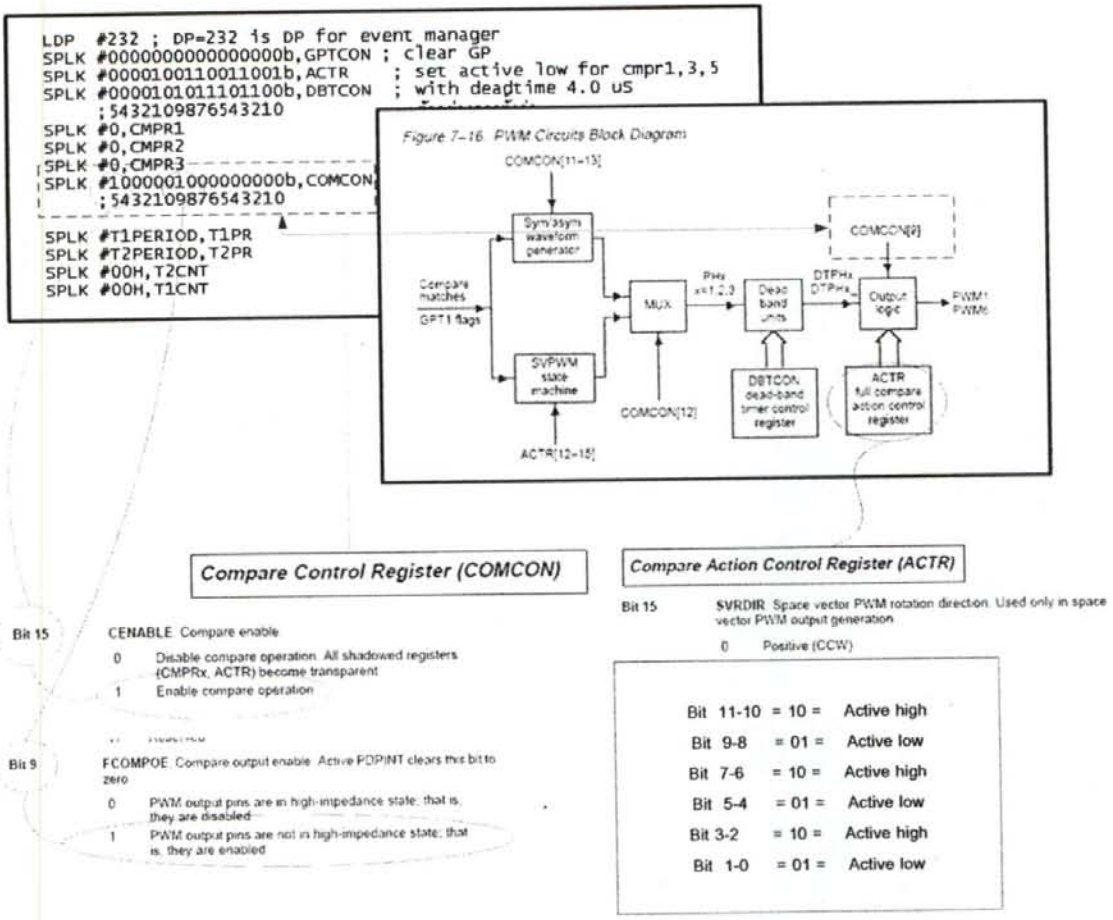
- Set and load ACTR.
- Setup and load DBTCON, if dead-band is to be used.
- Initialize CMPRx.
- Setup and load COMCON.
- Setup and load T1CON to start the operation.
- Rewrite CMPRx with newly determined values.



รูปที่ 5.10 สัญญาณเปรียบเทียบ (Compare) แบบ Symmetric waveform.

จากรูปที่ 5.10 สัญญาณ PWMx จะมีการเผื่อการประวิงเวลาด้วยเมื่อให้สวิตซ์ตัวบนนำกระแสเมื่อได้รับสัญญาณแบบขอบขาลง (active low) และสวิตซ์ตัวล่างทำงานเมื่อได้รับสัญญาณแบบขอบขาขึ้น (active high)

พิจารณาในรูปที่ 5.11 เป็นการเซตค่าของ COMCON และการตั้งค่า ACTR



รูปที่ 5.11 ตัวอย่างการเซตค่า COMCON และ ACTR

5.8 ตัวอย่างโปรแกรม

ตัวอย่างของโปรแกรมที่ใช้ในงานวิจัยนี้เขียนด้วยภาษาแอสเซมบีล ดังรูปที่ 5.12 ซึ่งได้แสดงในส่วนของเมนโปรแกรม ส่วนของการรับค่าแรงดันบัสไฟตรง และส่วนของการสร้างแรงดัน decoupling

ส่วนของเมนโปรแกรม

```
;--- Decoupling Control system test.asm ---
;This file for program test pwm generation for Decuopling Control
;with techniques SVPWM


                .include "24x.h"
;for TMS320F243

T1PERIOD  .set 1000
T2PERIOD  .set 65535
T1COMPARE .set 0
T2COMPARE .set 0
T3COMPARE .set 0
step            .set    30
Kcurrent        .set    0AD5h           ;Q8
;Vsmax           .set    319h            ;60 v   Q12 per unit
;Vsmin           .set    0FCE7h          ;-60V   Q12 per unit

Vsmax           .set    930h           ;210 v   Q12 per unit
Vsmin           .set    0F6D0h         ;-210V   Q12 per unit
```

ส่วนของโปรแกรมการตรวจจับแรงดันบัสไฟตรง

```
;-----------------------------------;
;   ADC PART...DETECT CURRENT AND Edc   ;
;-----------------------------------;

ADC:
        ldp     #00E0h  ;DP 7000h-707Fh

        splk    #1000100000000001b,ADCTRL1      ;A/D ch0(Ib)enable
                ;5432109876543210
        nop

        splk    #1000100000000100b,ADCTRL1      ;ADC1_ch2 for DC bus
                ;5432109876543210
```

ส่วนของโปรแกรมการสร้างแรงดัน Decuopling

```
;-----------------------------------;
;  Decoupling Voltage calculation  ;
;-----------------------------------;
Decoup :
        ldp     #6
        lacc    Isdest
        sub     Imr
        sacl    tmp
        lt      tmp
        ;mpy     #0E29h          ;sqr(M/Lr)Rr Q12/wbase
        mpy     #12
        pac
        sach    tmp2,4          ;store in Q12
        ;sach   mon,4
        lt      Wmr
          mpy   #45           ;sigmaLs in  Q12
        pac
        sach    tmp1,4
        lt      tmp1
        mpy     Isqest
        pac
        neg
        add     tmp2,12
        sach    decoup_d,4

; decoupling in q-axis

        lt      Wmr
        mpy     #219h           ;Ls Q12
        pac
        sach    tmp1,4
        lt      tmp1
        mpy     Isdest
```

รูปที่ 5.12 แสดงการเขียนโปรแกรมด้วยภาษาแอสเซมบลี