

Chapter 7

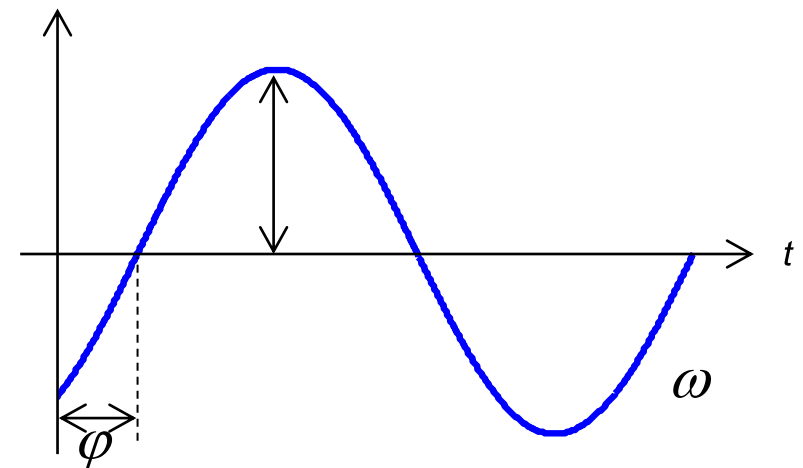
Power Supplies for AC Drives

Power Supplies for Adjustable Speed AC Drives

แบ่งออกเป็น

1) Voltage Source จ่ายแรงดัน V , ω , ϕ ใดๆได้

- Six-Step Inverters $\left\{ \begin{array}{l} \text{Voltage Source Inverter (VSI)} \end{array} \right.$
- PWM Inverters $\left\{ \begin{array}{l} \text{AC (50 Hz)} \rightarrow \text{DC} \rightarrow \text{AC} \end{array} \right.$
- Cycloconverters $\left\{ \begin{array}{l} \text{-MW range} \\ \text{AC (50 Hz)} \rightarrow \text{AC} \end{array} \right.$

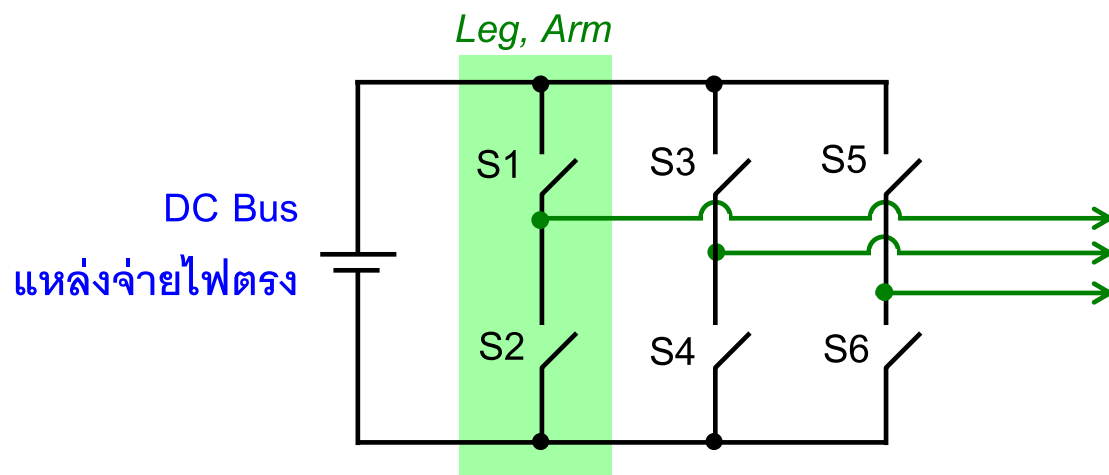


2) Current Source จ่ายกระแส I , ω , ϕ ใดๆได้

- Current Source Inverter [CSI]
- Current-Controlled Inverter [VSI+Current Feedback]
(-Regulated) [CCI, CRI]
 - Hysteresis Current Control
 - PI Current Control

Six-Step Inverters

โครงสร้างวงจรของ VSI



S1, S2 : ON พร้อมกันไม่ได้

S3, S4 : ON พร้อมกันไม่ได้

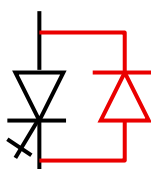
S5, S6 : ON พร้อมกันไม่ได้



= Power Devices ที่ ON/OFF
ได้ตามสัญญาณขับนำ

Anti-Parallel Diode

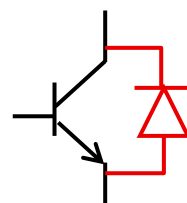
~~Thyristor~~



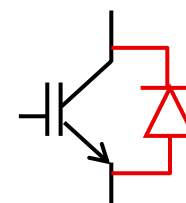
IGCT

GTO

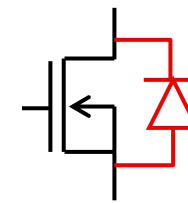
High Power



BJT



IGBT



MOSFET

Medium-Low Power

GTO: Gate Turn-Off Thyristors

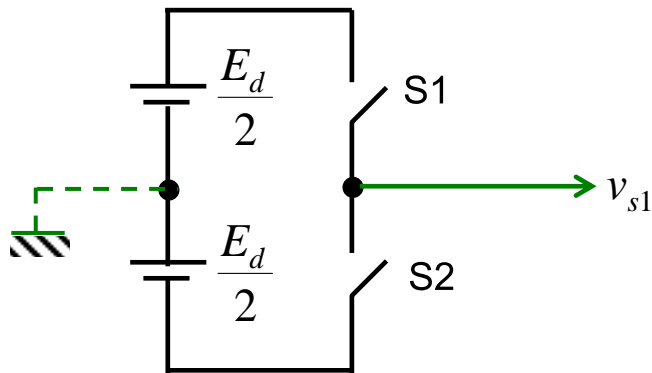
IGCT: Integrated Gate commutated Thyristors

BJT: Bipolar Junction Transistors

MOSFET:

IGBT: Insulated Gate Bipolar Transistors

การทำงาน



E_d : แรงดันที่ DC Bus

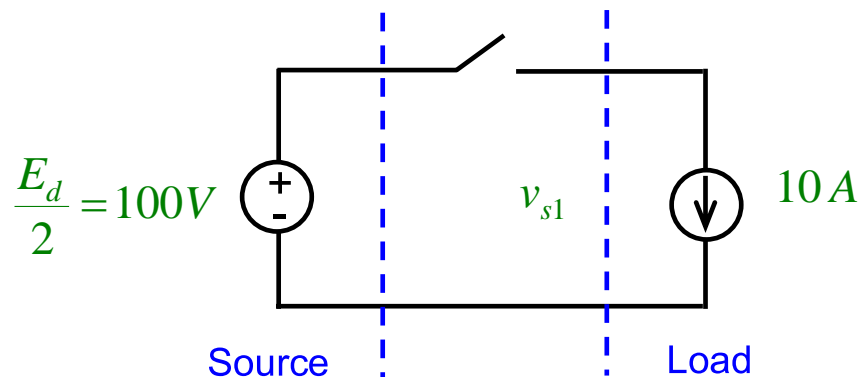
- S1 = ON (S2 = OFF)

$$v_{s1-0} = +E_d/2$$

- S1 = OFF (S2 = ON)

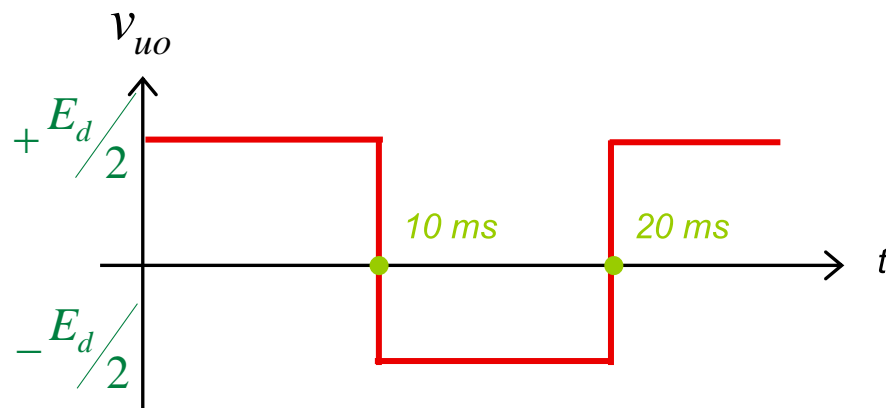
$$v_{s1-0} = -E_d/2$$

- แรงดันขาออกจะถูกกำหนดโดยสถานะของสวิตช์
- กระแสใน DC Bus จะถูกกำหนดโดยสถานะของสวิตช์เช่นกัน



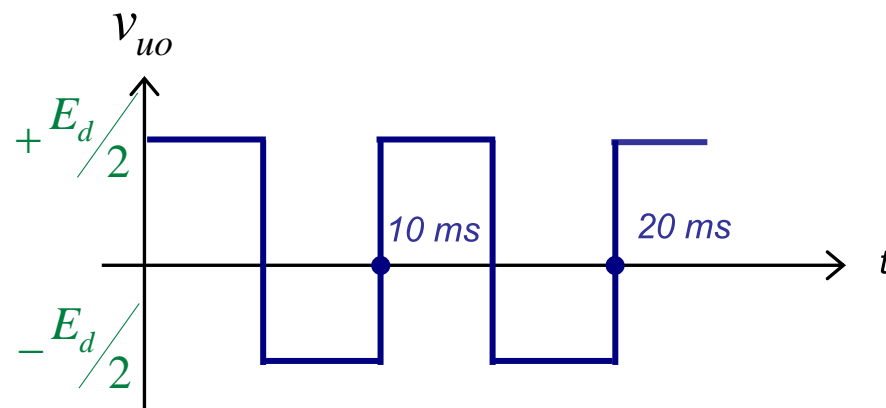
สำหรับ Six-Step Inverter

- S1, S3, S5 จะมีช่วงในการ ON = 180°
- โดยช่วงการ ON ของ S1, S3, S5 จะ shift phase กัน 120°



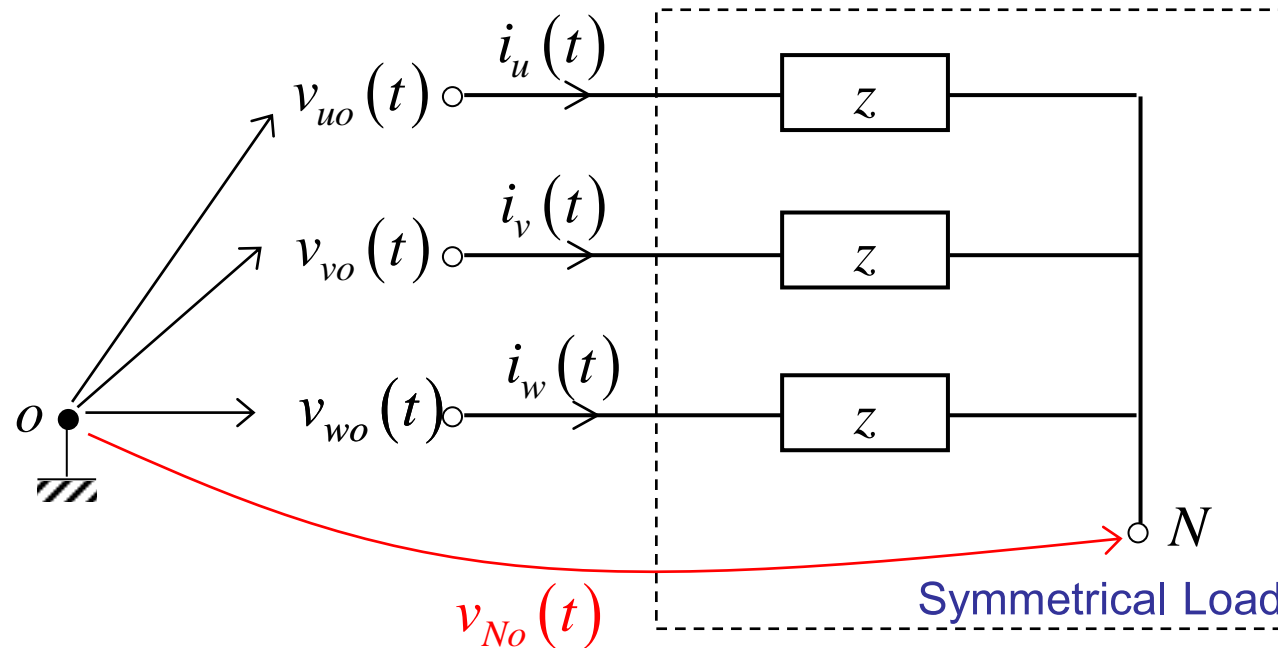
50 Hz

- ปรับได้แต่ความถี่ และมุมเฟส ω ϕ



100 Hz

- ไม่สามารถปรับขนาดแรงดันได้ V หากต้องการปรับขนาดแรงดันต้องเปลี่ยน E_d



สมการ

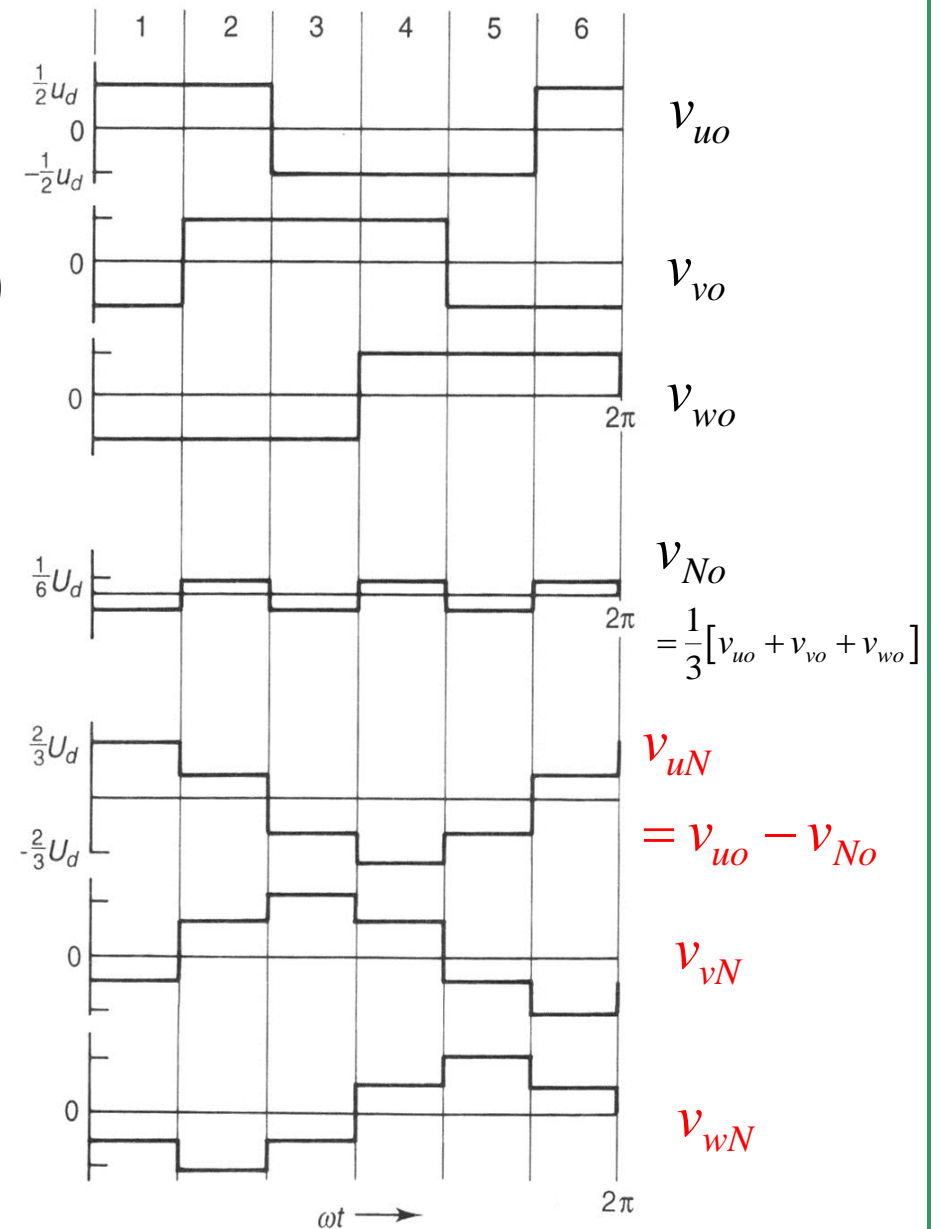
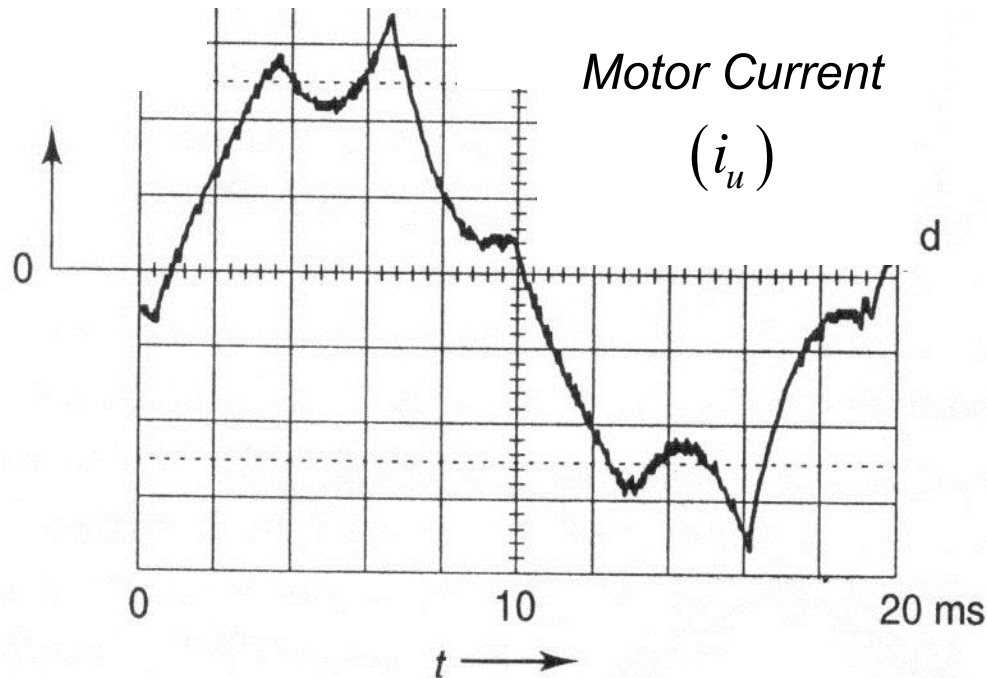
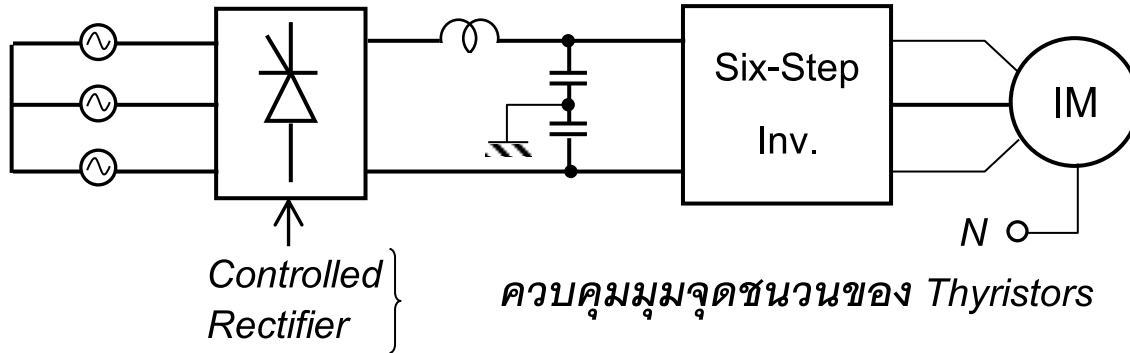
$$\text{<KVL> } \begin{cases} v_{uo}(t) = z \cdot i_u(t) + v_{No}(t) \\ v_{vo}(t) = z \cdot i_v(t) + v_{No}(t) \\ v_{wo}(t) = z \cdot i_w(t) + v_{No}(t) \end{cases}$$

$$\text{<KCL> } \begin{cases} i_u(t) + i_v(t) + i_w(t) = 0 \end{cases}$$

$$v_{uo}(t) + v_{vo}(t) + v_{wo}(t) = 3v_{No}(t)$$

$$v_{No}(t) = \frac{1}{3} [v_{uo}(t) + v_{vo}(t) + v_{wo}(t)]$$

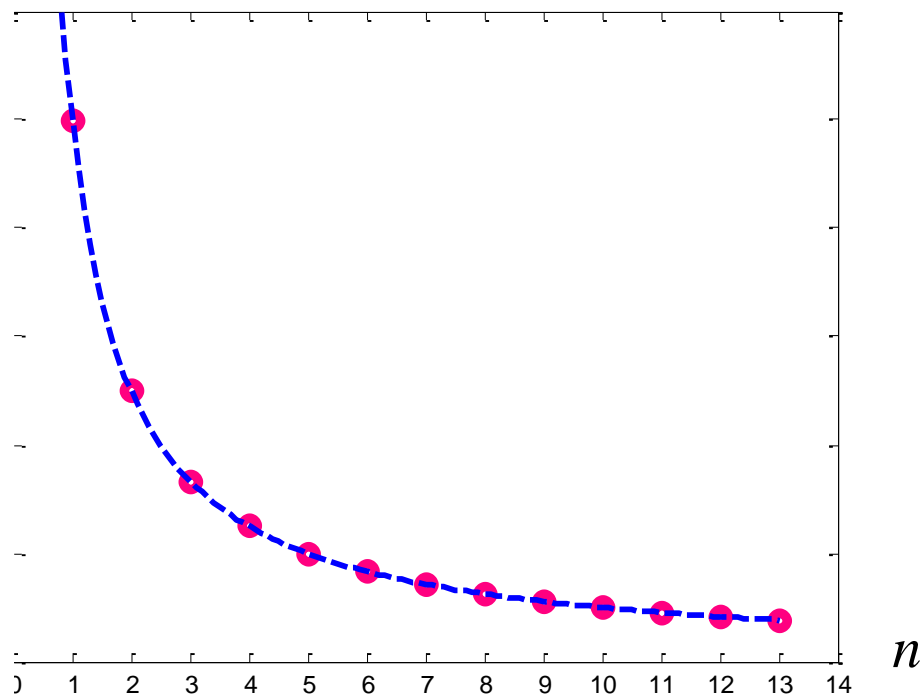
■ การปรับขนาดต้องทำในส่วน
วงจรเรียงกระแสโดยปรับแรงดัน DC BUS



$$v_{uo} = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{E_d}{2} \cdot \sum_{n=1,3,\dots} \frac{1}{n} \cdot \sin[n\omega t]$$

$$v_{vo} = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{E_d}{2} \cdot \sum_{n=1,3,\dots} \frac{1}{n} \cdot \sin\left[n\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)\right]$$

$$v_{wo} = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{E_d}{2} \cdot \sum_{n=1,3,\dots} \frac{1}{n} \cdot \sin\left[n\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right)\right]$$



- ✓ จำนวนครั้งของ Switching น้อย
- ✓ ไม่ต้องใช้ Power Devices ที่เร็ว
- ✗ Harmonics สูง/Torque Ripple

Triplen Harmonics

$$v_{No} = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{E_d}{2} \cdot \sum_{n=3,9,15,\dots} \frac{1}{n} \cdot \sin[n\omega t]$$

Phase Voltage

$$v_{uN} = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{E_d}{2} \cdot \sum_{n=1,5,7,\dots} \frac{1}{n} \cdot \sin[n\omega t]$$
$$n = \begin{cases} 6m-1 & ; m=1,2,3,\dots \\ 6m+1 & ; m=0,1,2,\dots \end{cases}$$

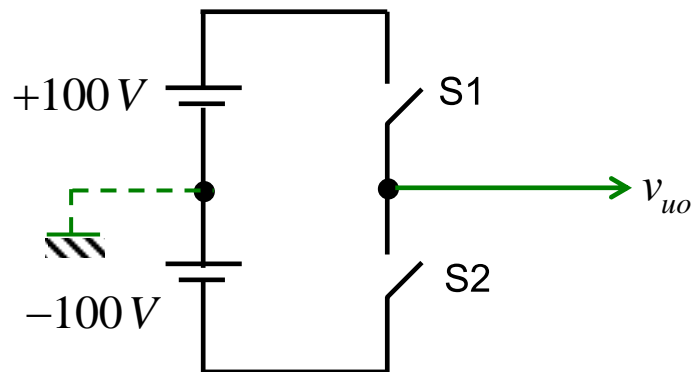
$$\text{ค่า R.M.S. ของแรงดันเฟส} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} E_d$$

$$\text{ค่า R.M.S. ของแรงดัน line-line} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} E_d$$

(องค์ประกอบหลักมูล)

b) Pulse Width-Modulation Inverters (PWM Inverters)

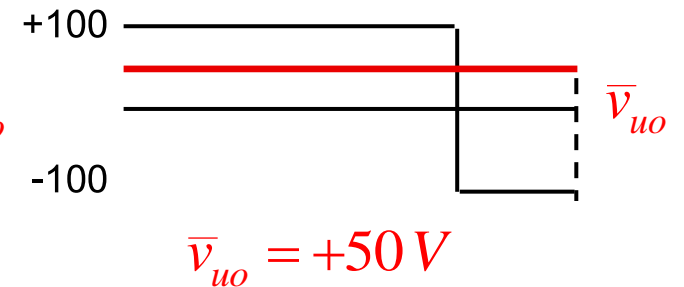
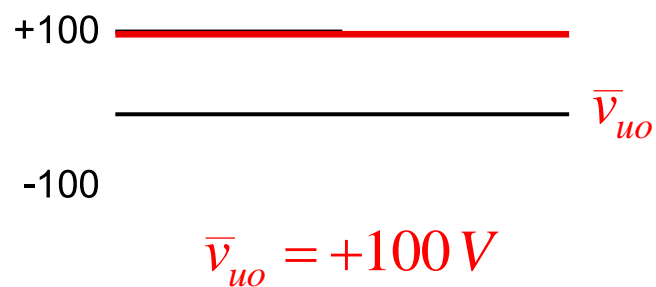
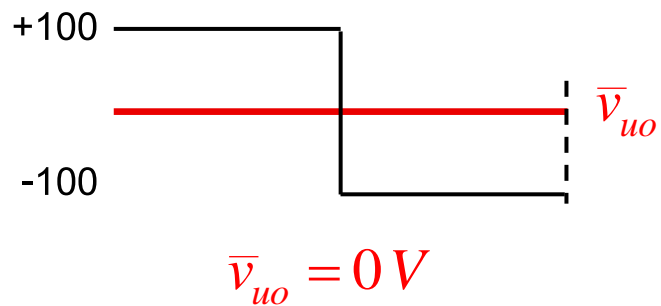
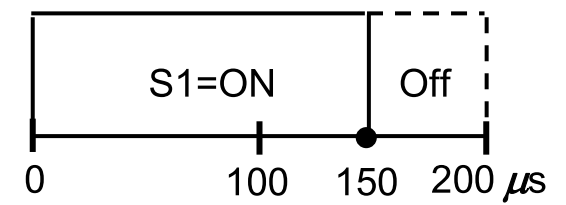
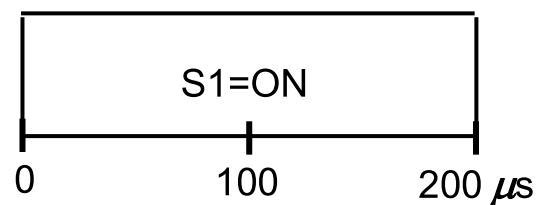
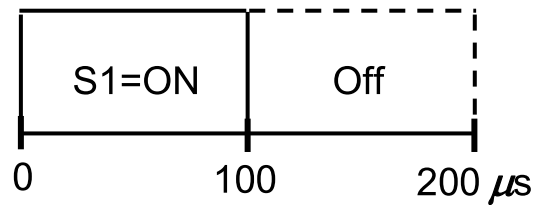
- ลด Harmonics ที่ความถี่ต่ำของ Six-Step Inverter
- ใช้การปรับ duty cycle (อัตราส่วน $\frac{T_{on} \text{ ของ } S1}{T_{on}+T_{off} \text{ ของ } S1}$)



ให้ค่าเฉลี่ยแรงดันมีค่าตามต้องการ

Ex $E_d = 200 \text{ V}; T = 200 \mu\text{s}$

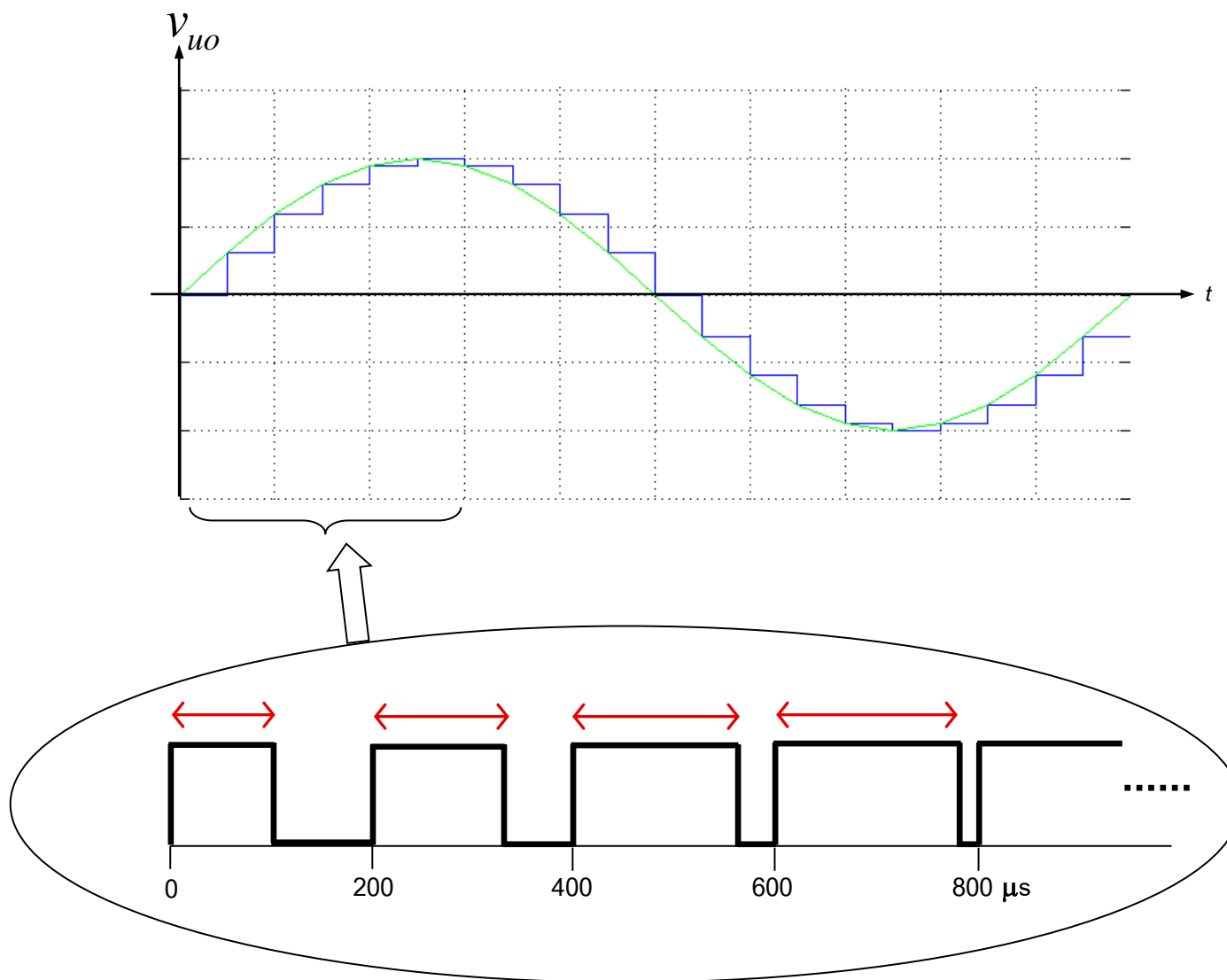
$$\therefore v_{uo} = \begin{cases} +100 \text{ V} \\ -100 \text{ V} \end{cases}$$



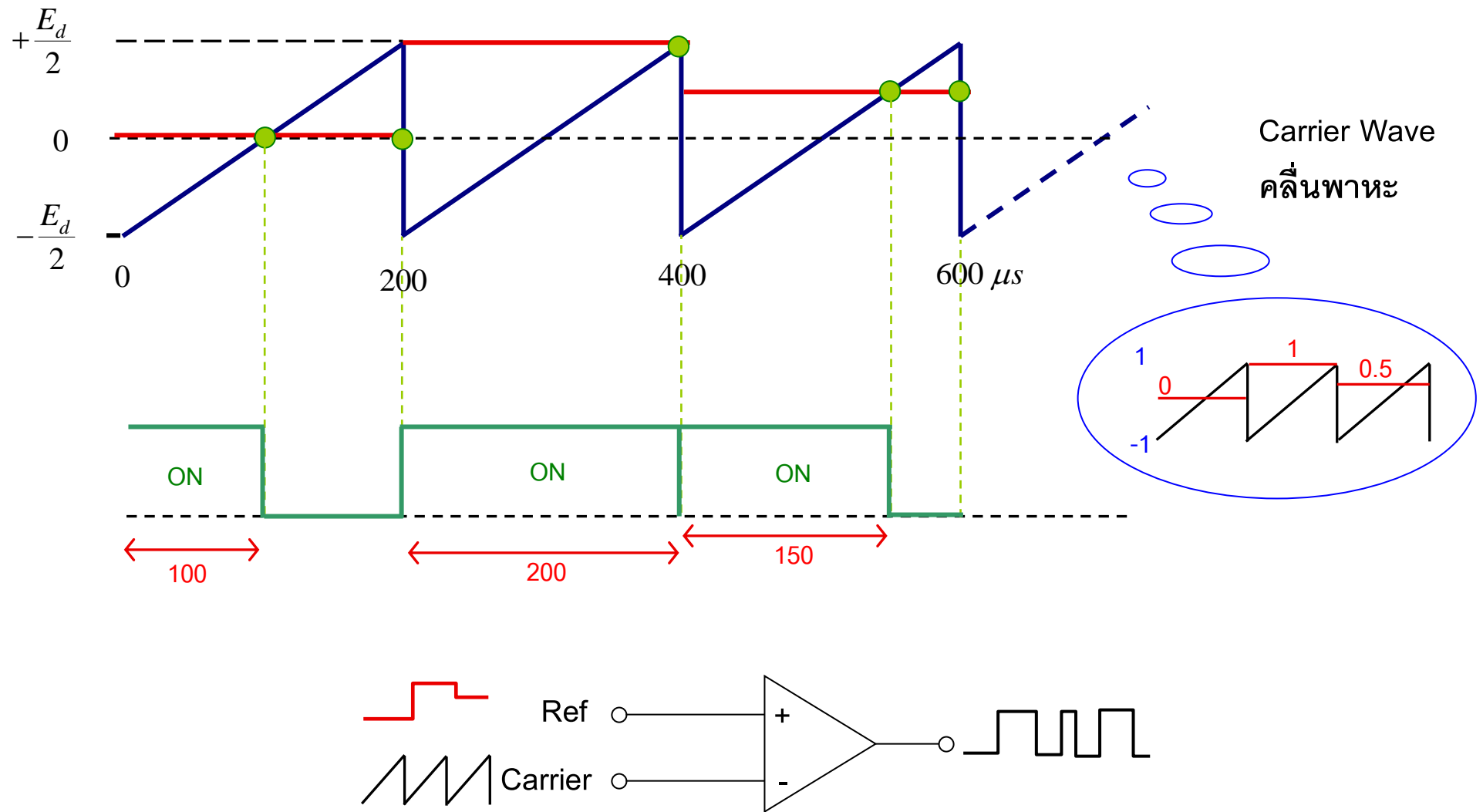
เราสามารถปรับค่าเฉลี่ยของแรงดันได้อย่างต่อเนื่องระหว่างค่า

$$+\frac{E_d}{2} \sim -\frac{E_d}{2} \quad (+100V \sim -100V)$$

- ถ้าเราเปลี่ยนค่าเฉลี่ย \bar{v}_{uo} ไปทุกๆ Cycle ก็จะได้รูปคลื่นแรงดันออกที่มีค่าเฉลี่ยตามต้องการได้



วิธีการหาตำแหน่งเวลาการสวิตช์



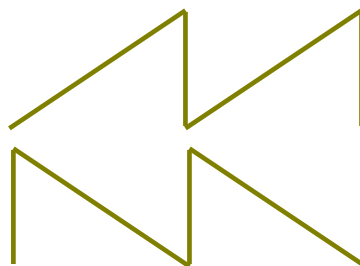
Pulse-Width Modulation (PWM)

■ ชนิดของ Carrier Wave

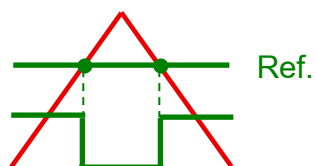
1) สามเหลี่ยม (Triangular)



2) ฟันเลื่อย (Saw Tooth)

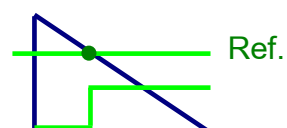
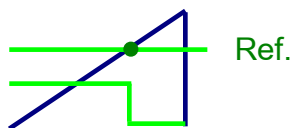


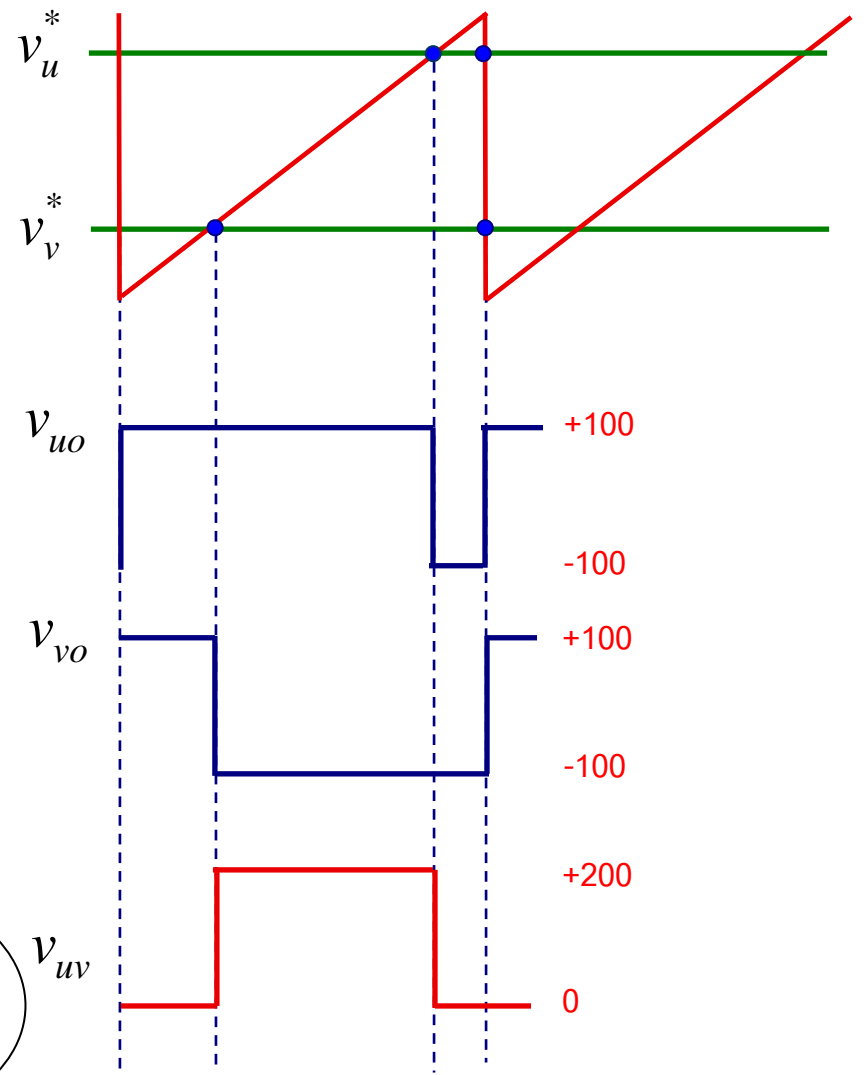
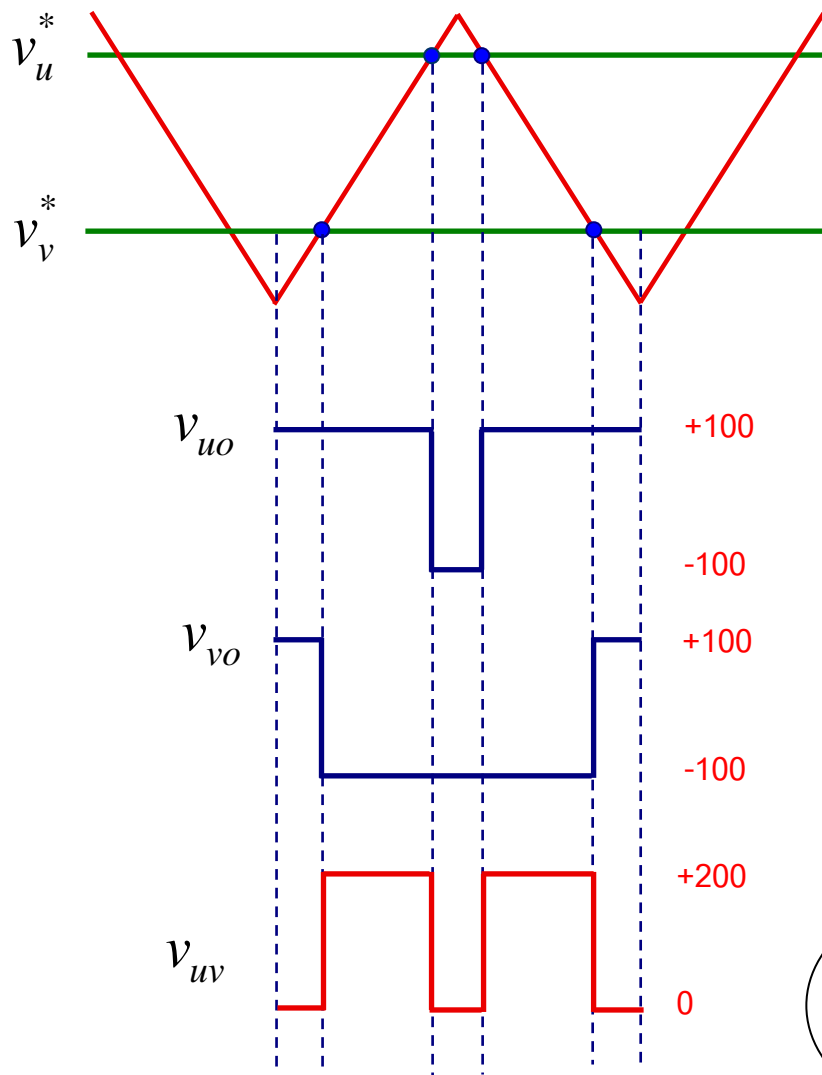
Double Edge Modulation



การกระจายของ Harmonics จะย้ายไปอยู่ที่ความถี่ $2 \cdot f_{sw}$

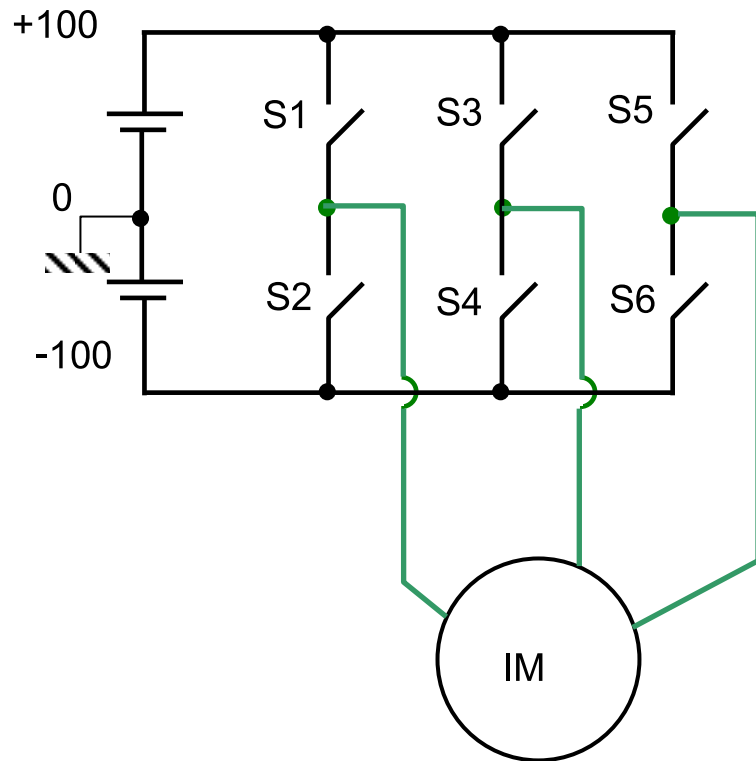
Single Edge Modulation





จำนวน pulse
เป็น 2 เท่า

■ จำนวน ARM ที่ถูก modulated
มอเตอร์

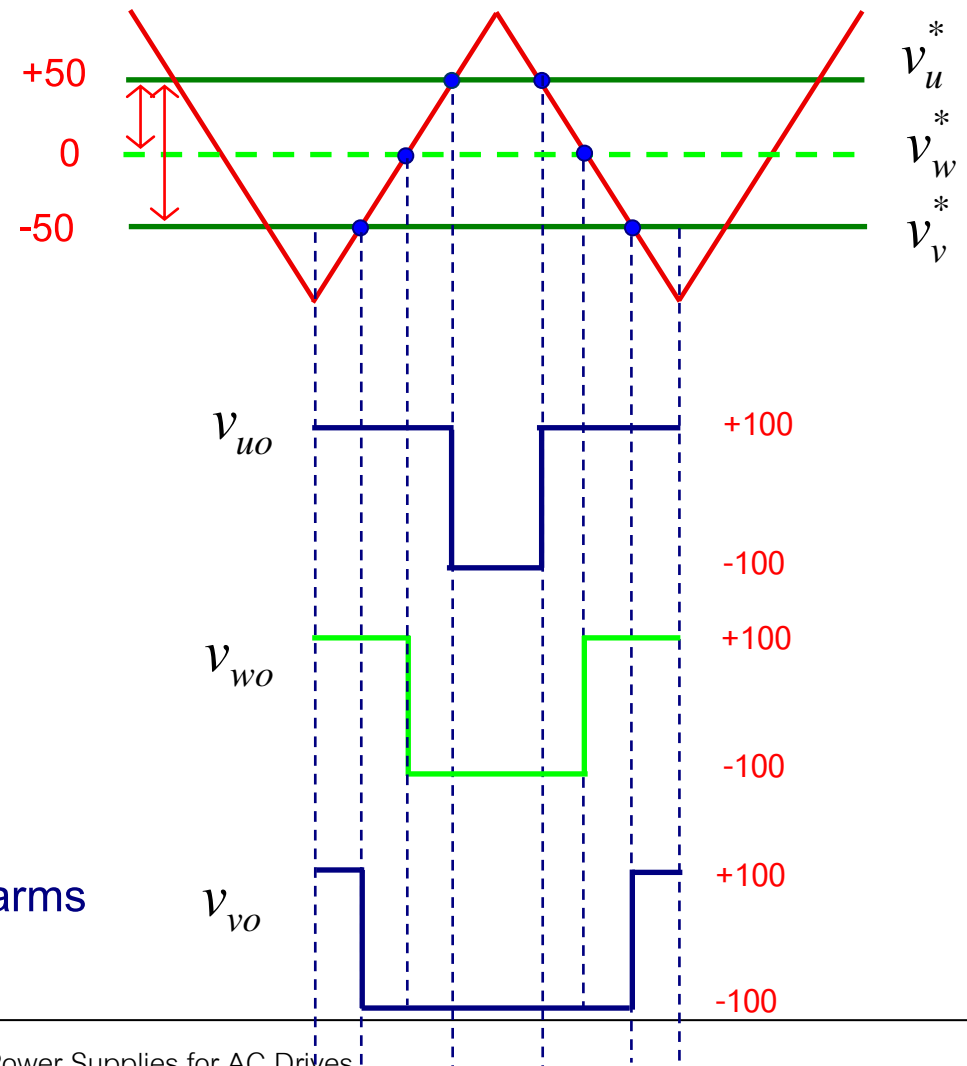


มีการสวิตช์ ON-OFF ทั้ง 3 arms

แรงดัน line-to-line เป็นตัวกำหนดกระแสใน

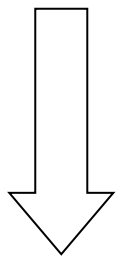
ex $v_{uv} = 100\text{ V}$

$v_{uw} = 50\text{ V}$

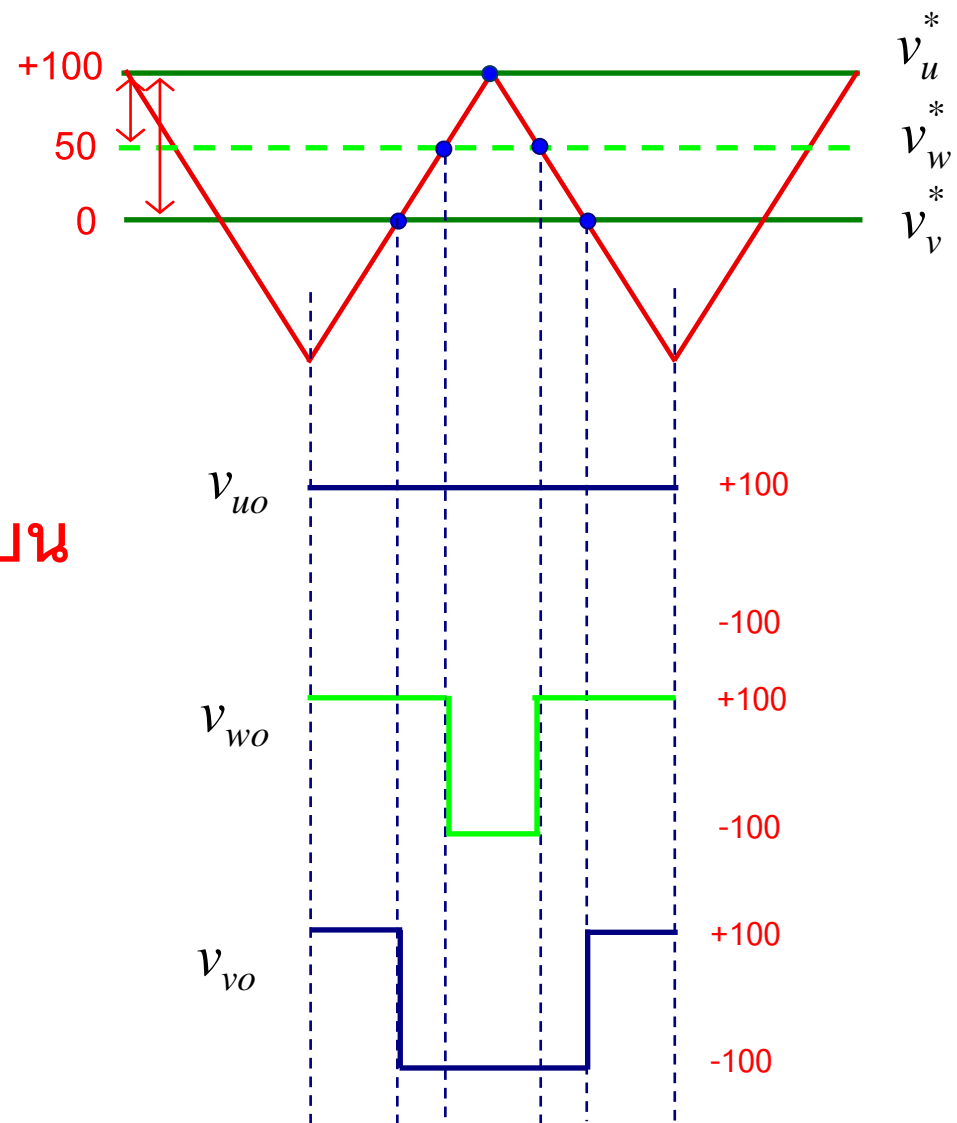


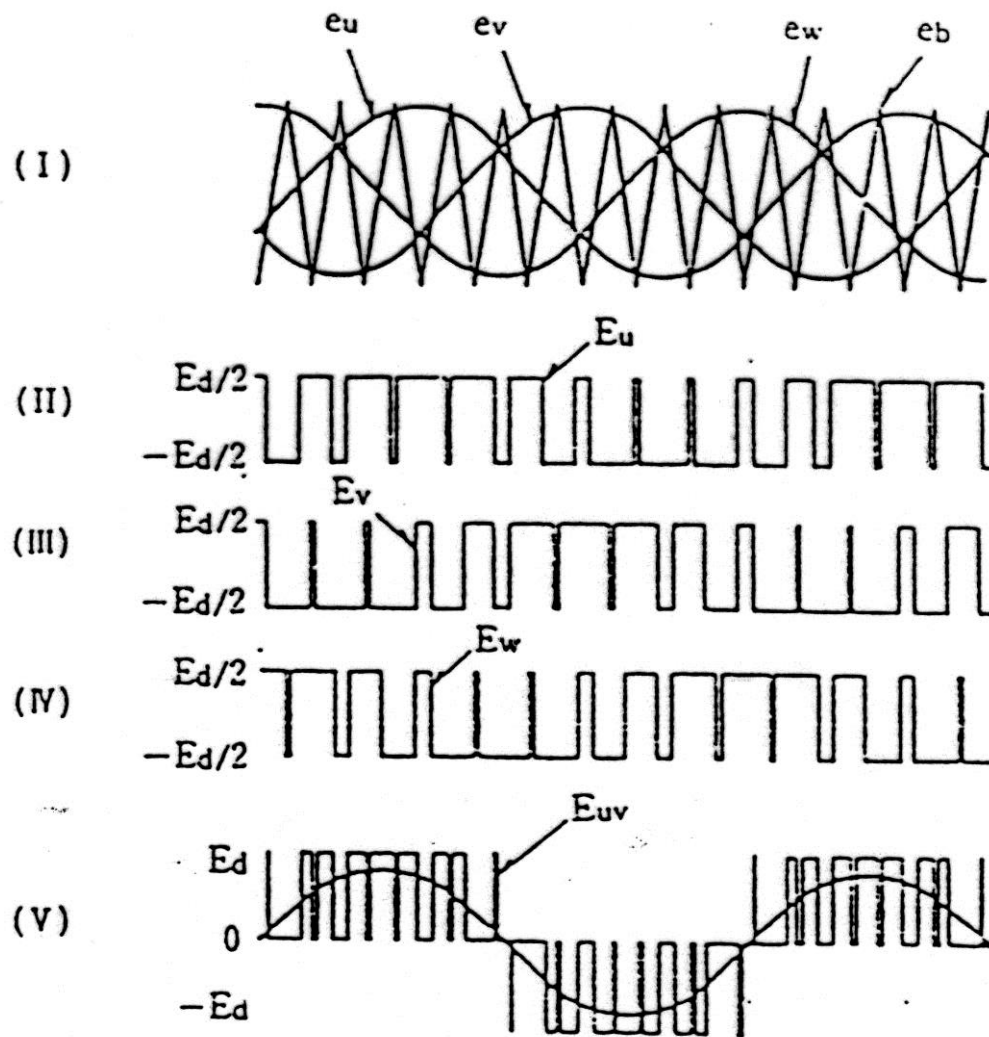
- 2 arms modulation
- Line-to-line voltage modulation

มีการสวิตช์เพียง 2/3 ของกรณีบน

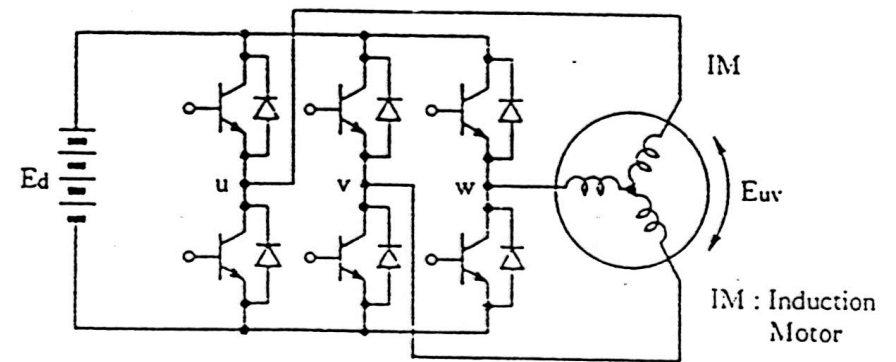


ลด Switching Losses ได้ 1/3



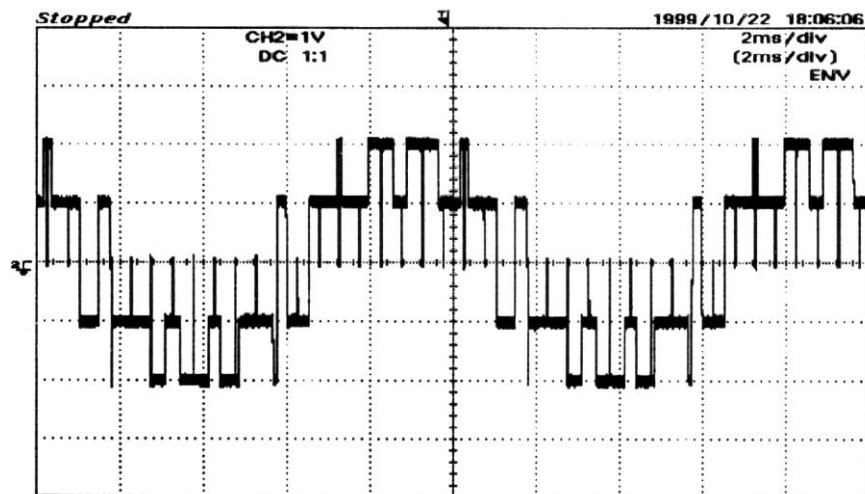


(a) PWM signal based on sinusoidal modulation.

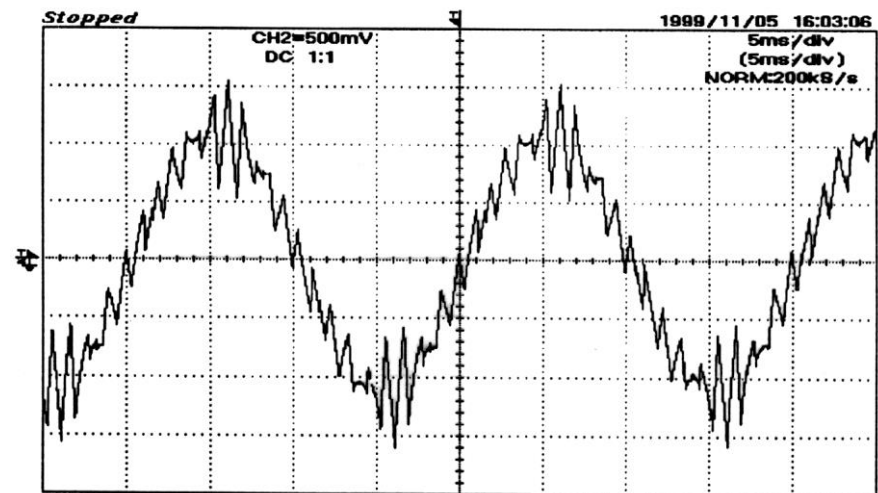


(b) Three-phase half bridge inverter.

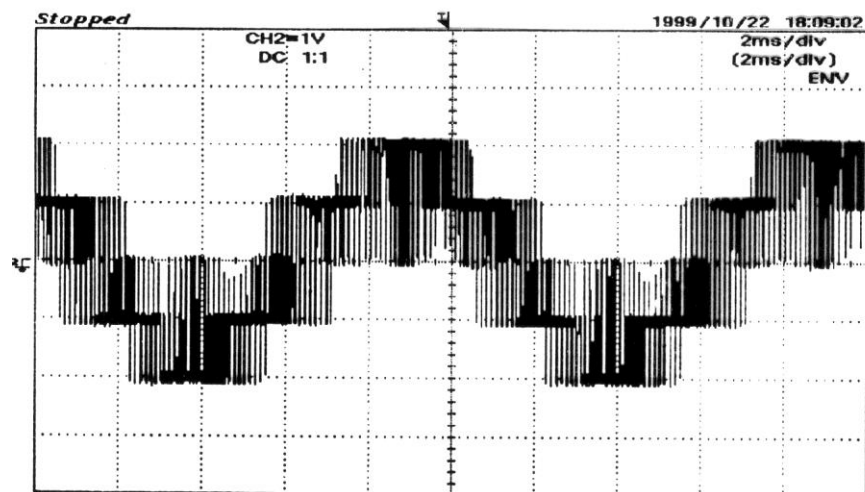
Sinusoidal-triangular wave form comparison method.



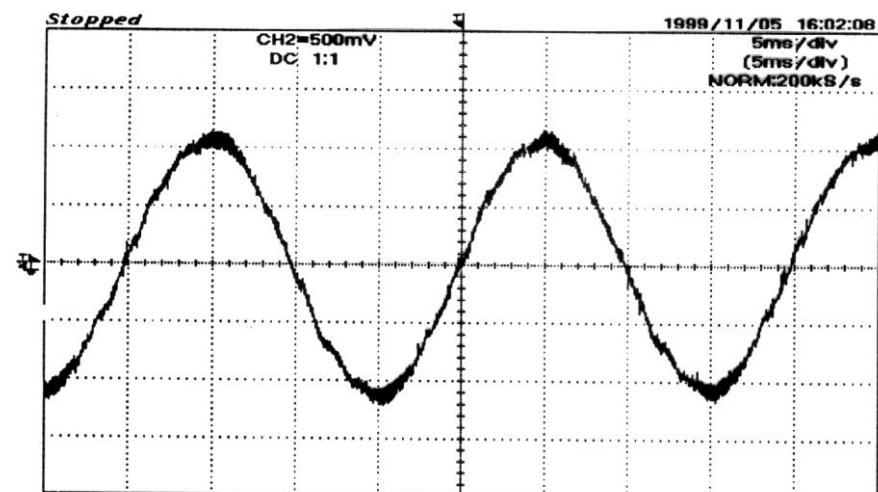
รูปคลื่นแรงดันมอเตอร์ที่ความถี่การสวิตช์ 1 kHz (1 ms)



รูปคลื่นกระแสเดเตอร์ที่ความถี่การสวิตช์ 1 kHz

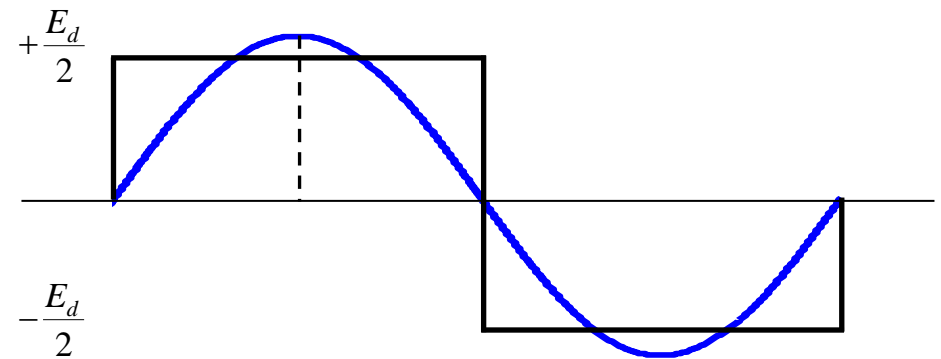
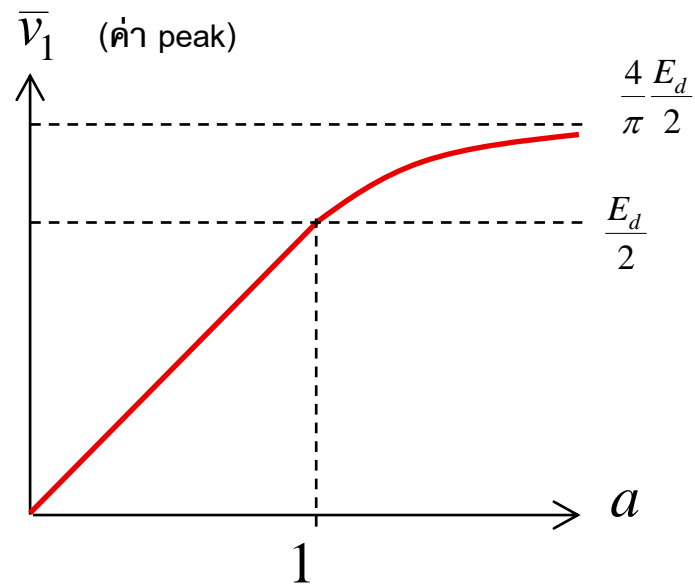
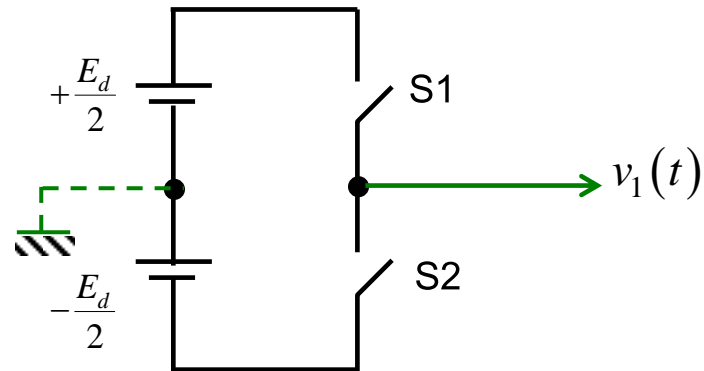


รูปคลื่นแรงดันมอเตอร์ที่ความถี่การสวิตช์ 8 kHz (125 μs)



รูปคลื่นกระแสเดเตอร์ที่ความถี่การสวิตช์ 16 kHz

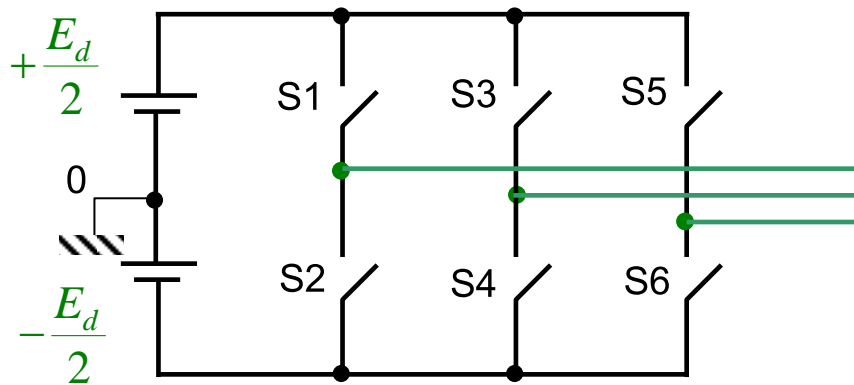
Note $v_1(t)$ เป็นแรงดันเทียบกับจุดกึ่งกลางของ DC Bus



Space Vector PWM

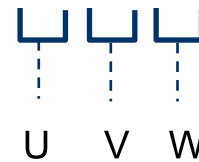
- การทำ PWM ในมุมมอง “Space Vector” → ให้ค่าเฉลี่ย “Space Vector” เท่ากัน

Voltage (Space) Vector ที่ Inverter สร้างได้



Symbol : “1” → upper switch “ON”

“0” → lower switch “ON”



Ex “1 0 0” S1 = ON, S4 = S6 = ON

* States ของ Inverter มีด้วยกันทั้งหมด = $2^3 = 8$ รูปแบบ

Active Vectors $\begin{cases} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{cases}$

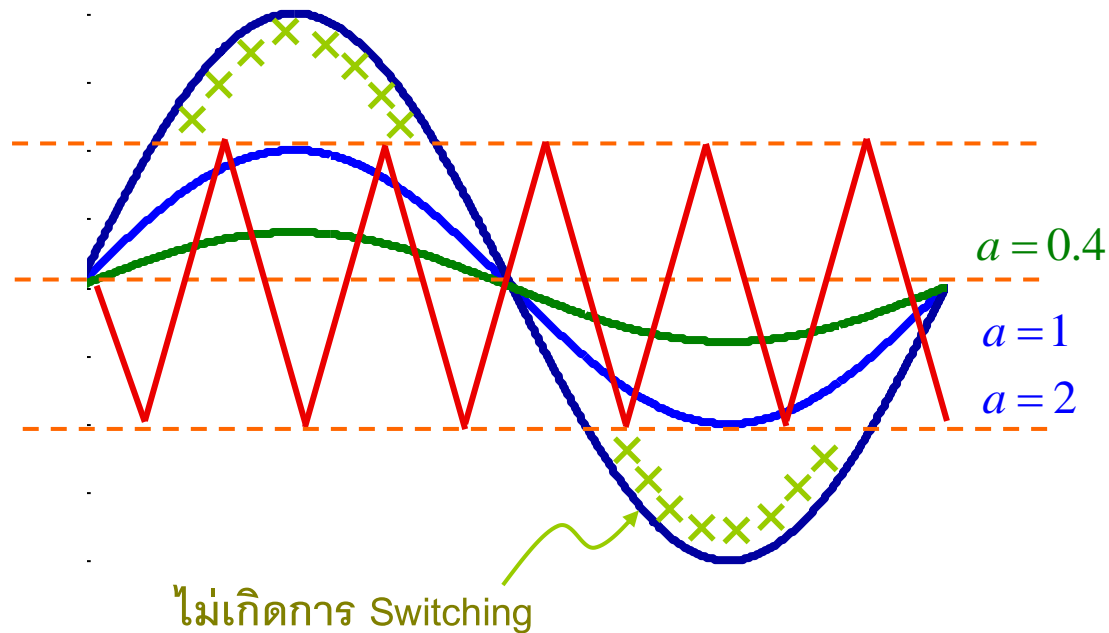
Zero Vectors $\{ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \}$

สำหรับกรณี 3 ϕ : แรงดัน line-to-line จะมี Harmonics เป็นดังนี้

$$\omega_o : \sqrt{3} \cdot a \cdot \frac{E_d}{2}$$

$$n\omega_s \pm k\omega_o : \sqrt{3} \cdot \frac{4}{n\pi} \cdot \frac{E_d}{2} \cdot J_k\left(\frac{an\pi}{2}\right) \quad ; \quad \begin{array}{ll} n=1,3,5\dots & k=0,2,4,8,10,\dots \\ n=2,4,6\dots & k=1,5,7,11,13,\dots \end{array}$$

โดยทั่วไปเราเรียก “ a ” = Modulation Index ($0 \leq a \leq 1$)

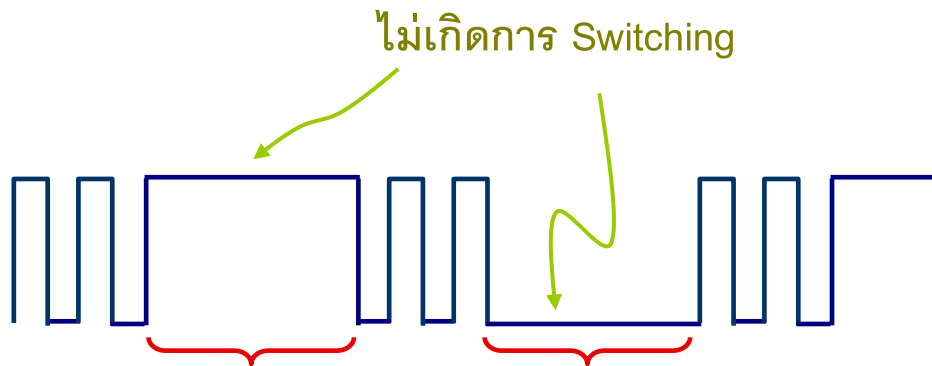


$a > 1$ ก็สามารถทำได้



Overmodulation

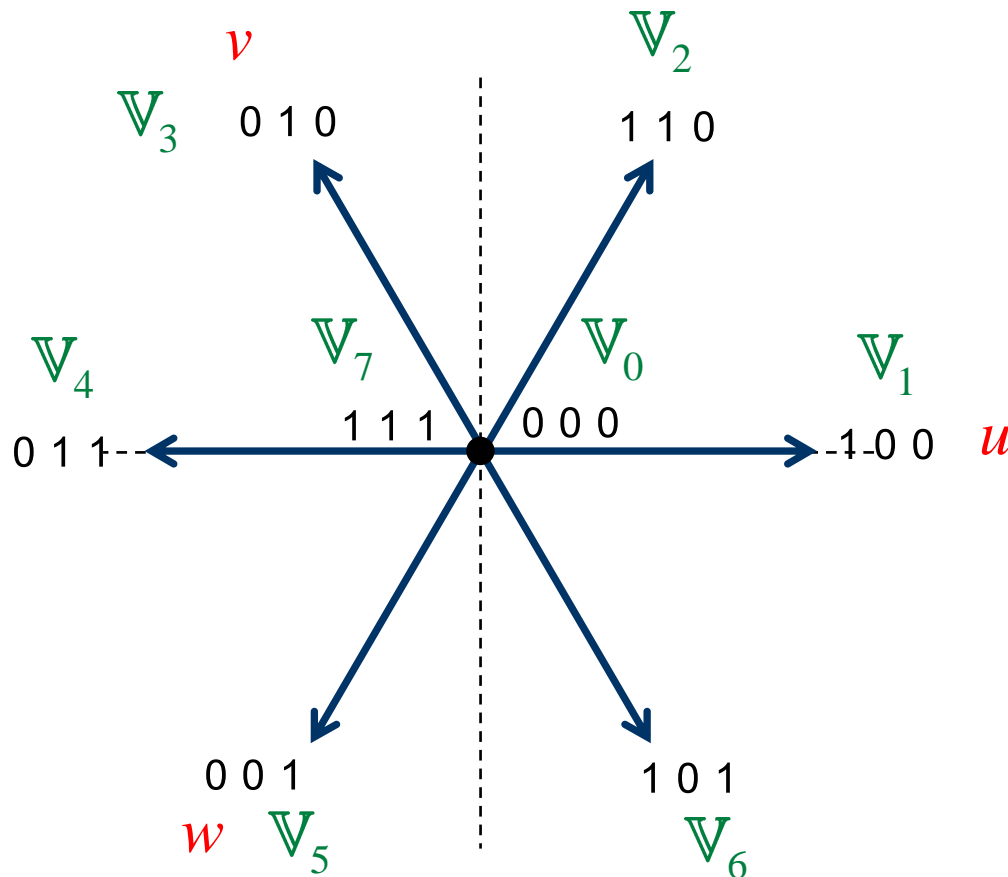
Overmodulation



- ✗ Pulse Dropping Phenomena
- ✗ เกิด Harmonics อันดับต่ำ
- ✓ ให้แรงดันเฉลี่ยสูงขึ้น
- $a = \infty$ จะกลายเป็น Six-Step Inverter

“1 0 0” : $v_{uo} = \frac{E_d}{2}, v_{vo} = -\frac{E_d}{2}, v_{wo} = -\frac{E_d}{2}$

คิดเป็น Space Vector



$$\begin{aligned} \mathbb{V}_1 &= \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ -1 \end{bmatrix} \cdot \frac{E_d}{2} \\ &= \begin{bmatrix} 2 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot \frac{E_d}{2} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot E_d \end{aligned}$$

“1 1 0” : $\begin{cases} v_{uo} = E_d/2 \\ v_{vo} = E_d/2 \\ v_{wo} = -E_d/2 \end{cases}$

$$\therefore \mathbb{V}_2 = \begin{bmatrix} 1/2 \\ \sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \cdot E_d$$

“0 0 0” $\therefore \mathbb{V}_0 = 0$; “1 1 1” $\therefore \mathbb{V}_7 = 0$

แนวคิด

(1) ต้องการ $\begin{bmatrix} v_{uN} \\ v_{vN} \\ v_{wN} \end{bmatrix} \Rightarrow \mathbf{V}^*$ (Space Vector)

(2) เลือกรูปแบบการใช้ $\mathbf{V}_0 \sim \mathbf{V}_7$ ภายในคาบเวลาการสวิตช์
(Carrier/Switching Period) ให้ $\bar{\mathbf{V}} = \mathbf{V}^*$

ถ้า $v_{uN} + v_{vN} + v_{wN} = 0$ จะได้ $\bar{v}_{uN} = v_{uN}$; $\bar{v}_{vN} = v_{vN}$; $\bar{v}_{wN} = v_{wN}$

กรณีทั่วไป

(1) เลือก Vector ที่ใช้ในการสวิตช์ โดยดูว่า \mathbf{V}^* ตกอยู่ที่ Sector ไດ \rightarrow เลือก Vector ที่ประกอบเป็น Sector นั้น (รวม $\mathbf{V}_0, \mathbf{V}_7$ ด้วย)

Sec. 1 = $\mathbf{V}_1, \mathbf{V}_2, \mathbf{V}_0, \mathbf{V}_7$

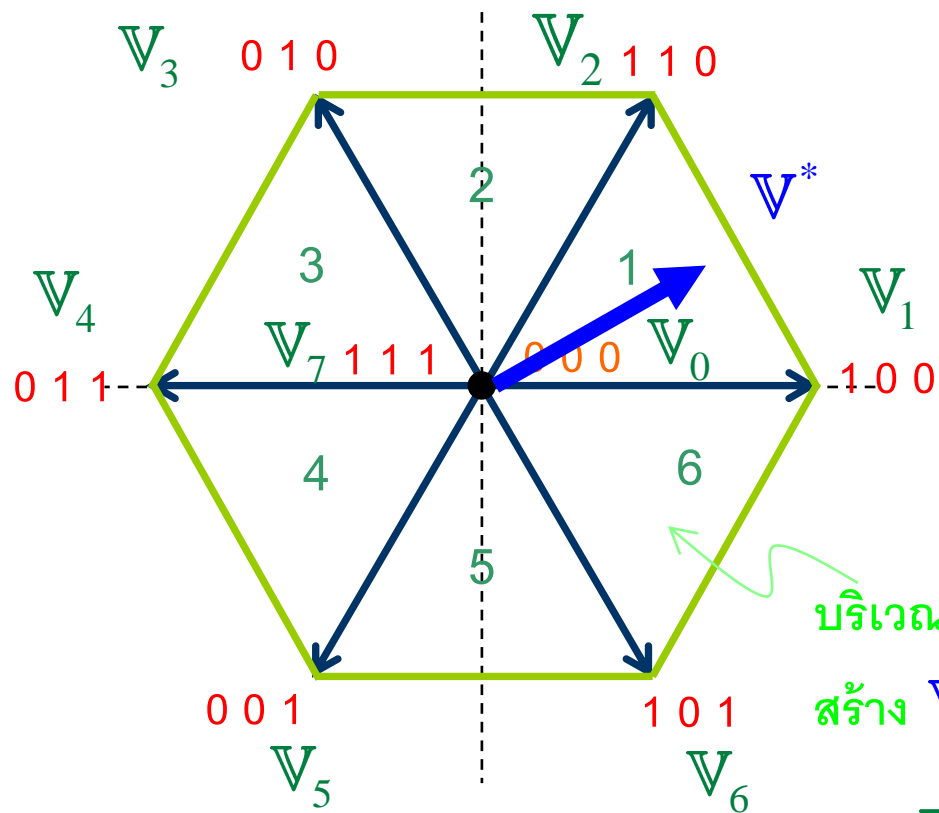
Sec. 4 = $\mathbf{V}_4, \mathbf{V}_5, \mathbf{V}_0, \mathbf{V}_7$

Sec. 2 = $\mathbf{V}_2, \mathbf{V}_3, \mathbf{V}_0, \mathbf{V}_7$

Sec. 5 = $\mathbf{V}_5, \mathbf{V}_6, \mathbf{V}_0, \mathbf{V}_7$

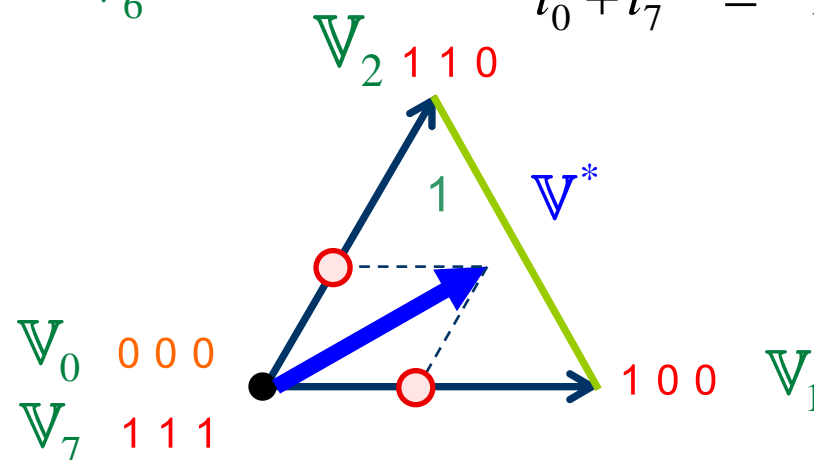
Sec. 3 = $\mathbf{V}_3, \mathbf{V}_4, \mathbf{V}_0, \mathbf{V}_7$

Sec. 6 = $\mathbf{V}_6, \mathbf{V}_1, \mathbf{V}_0, \mathbf{V}_7$

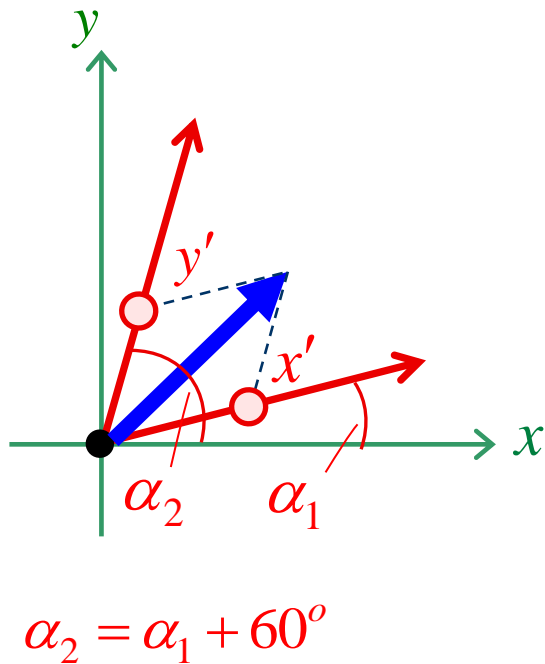


(2) แดก V^* เป็นองค์ประกอบในแนว Vector
 ที่เลือก $V^* = V_a + V_b$

$$\left\{ \begin{array}{l} t_a = \frac{|V_a|}{|V_1|} \times T \leq T \\ t_b = \frac{|V_b|}{|V_2|} \times T \leq T \\ t_{zero} = T - t_a - t_b \geq 0 ; \text{Zero Vectors} \\ t_0 + t_7 = T - t_a - t_b \end{array} \right.$$



การคำนวณหาค่า t_a, t_b



กำหนดให้ $\mathbf{V}^* = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} (x + jy)$

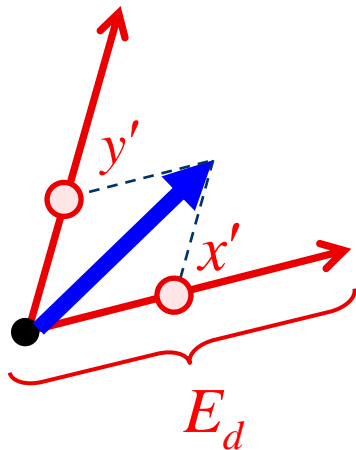
$$x = x' \cos \alpha_1 + y' \cos \alpha_2$$

$$y = x' \sin \alpha_1 + y' \sin \alpha_2$$

$$\therefore \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \frac{1}{\underbrace{\begin{pmatrix} \cos \alpha_1 \sin \alpha_2 \\ -\cos \alpha_2 \sin \alpha_1 \end{pmatrix}}_{\sin(\alpha_2 - \alpha_1)}} \cdot \begin{bmatrix} \sin \alpha_2 & -\cos \alpha_2 \\ -\sin \alpha_1 & \cos \alpha_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \begin{bmatrix} \sin \alpha_2 & -\cos \alpha_2 \\ -\sin \alpha_1 & \cos \alpha_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad **$$

$$\begin{bmatrix} \frac{t_a}{T} \\ \frac{t_b}{T} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{x'}{E_d} \\ \frac{y'}{E_d} \end{bmatrix} = \frac{2}{\sqrt{3}E_d} \cdot \begin{bmatrix} \sin \alpha_2 & -\cos \alpha_2 \\ -\sin \alpha_1 & \cos \alpha_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$$



กำหนดให้ $\begin{cases} x = A \cos \theta \\ y = A \sin \theta \end{cases}$

$$\begin{bmatrix} \frac{t_a}{T} \\ \frac{t_b}{T} \end{bmatrix} = \frac{2A}{\sqrt{3}E_d} \cdot \begin{bmatrix} \sin(\alpha_2 - \theta) \\ \sin(\theta - \alpha_1) \end{bmatrix}$$

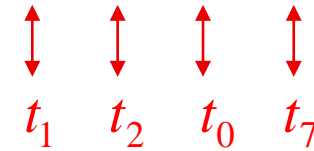
$$= \frac{2A}{\sqrt{3}E_d} \cdot \begin{bmatrix} \sin\left(\alpha_1 + \frac{\pi}{3} - \theta\right) \\ \sin(\theta - \alpha_1) \end{bmatrix} **$$

สำหรับ Sector 1

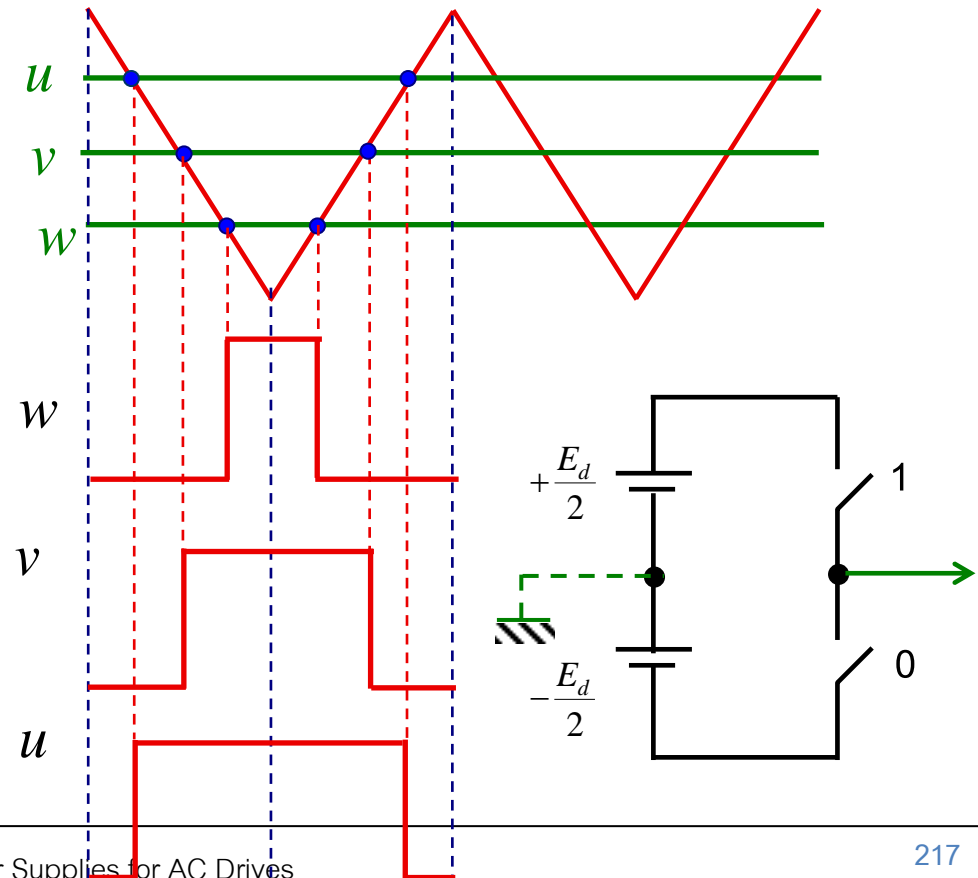
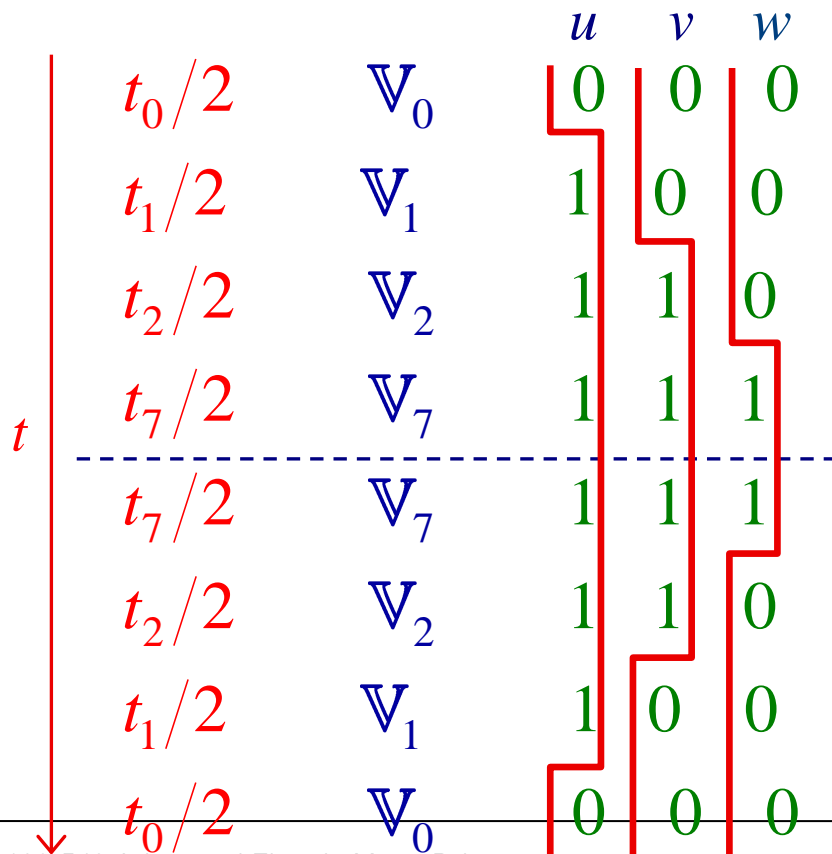
$$\alpha_1 = 0, \alpha_2 = \pi/3 \quad ; \quad 0 \leq \theta < \pi/3 \quad [\mathbb{V}_1, \mathbb{V}_2, \mathbb{V}_0, \mathbb{V}_7]$$

$$\begin{bmatrix} \frac{t_a}{T} \\ \frac{t_b}{T} \end{bmatrix} = \frac{2A}{\sqrt{3}E_d} \cdot \begin{bmatrix} \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta\right) \\ \sin(\theta) \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} t_1 = t_a ; t_2 = t_b \\ T = t_1 + t_2 + t_0 + t_7 \\ t_0 = t_7 \end{cases}$$



การเรียงลำดับ Vector (Double Edge Modulation)



$$\begin{aligned}\bar{v}_{uo} &= \frac{t_1 + t_2}{T} \cdot \frac{E_d}{2} = \frac{A}{\sqrt{3}} \left[2 \sin \frac{\pi}{6} \cdot \cos \left(\frac{\pi}{6} - \theta \right) \right] \\ &= \frac{A}{\sqrt{3}} \cos \left(\theta - \frac{\pi}{6} \right)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{v}_{vo} &= \frac{t_2 - t_1}{T} \cdot \frac{E_d}{2} = \frac{A}{\sqrt{3}} \left[2 \cos \frac{\pi}{6} \cdot \sin \left(\theta - \frac{\pi}{6} \right) \right] \\ &= A \sin \left(\theta - \frac{\pi}{6} \right) = A \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{v}_{wo} &= -\frac{(t_1 + t_2)}{T} \cdot \frac{E_d}{2} = -\frac{A}{\sqrt{3}} \cdot \cos \left(\theta - \frac{\pi}{6} \right) \\ &= -\bar{v}_{uo}\end{aligned}$$

$$\text{จาก } \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{pmatrix} \leftrightarrow \begin{cases} v_{un} = \frac{2}{3} A \cos \theta \\ v_{vn} = \frac{2}{3} A \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) \\ v_{wn} = \frac{2}{3} A \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \end{cases}$$

Zero Sequence Voltage

$$\bar{v}_{No} = \frac{1}{3} \bar{v}_{vo} = \frac{A}{3} \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) = \frac{1}{2} v_{vN}$$

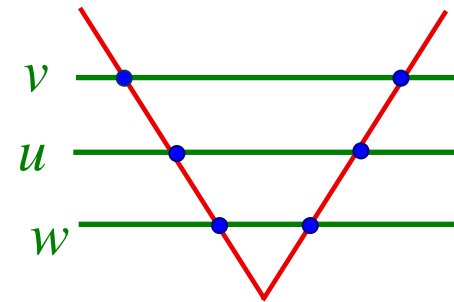
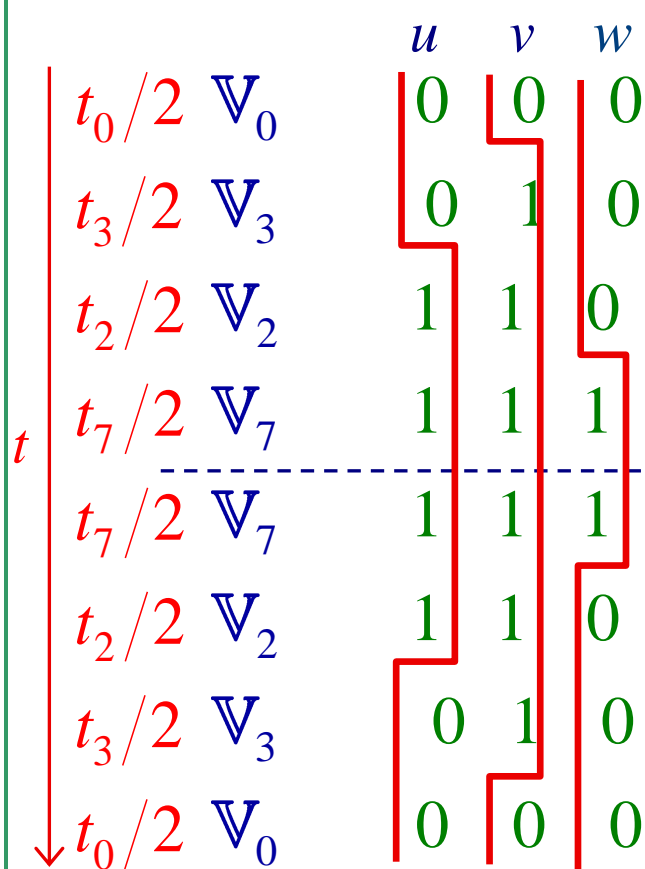
พบว่า การทำ Space Vector PWM แบบ Double Edge Modulation

= การบวกแรงดัน Zero Sequence Voltage $\frac{1}{2} v_{vN}$ เข้าไปในทุกเฟส (ของการทำ PWM โดยใช้ triangular carrier wave)

สำหรับ Sector 2

$$\alpha_1 = \pi/3, \alpha_2 = 2\pi/3 \quad ; \quad \pi/3 \leq \theta \leq 2\pi/3 \quad [\mathbb{V}_2, \mathbb{V}_3, \mathbb{V}_0, \mathbb{V}_7]$$

$$\begin{bmatrix} \frac{t_2}{T} \\ \frac{t_3}{T} \end{bmatrix} = \frac{2A}{\sqrt{3}E_d} \cdot \begin{bmatrix} \sin\left(\frac{2\pi}{3} - \theta\right) \\ \sin\left(\theta - \frac{\pi}{3}\right) \end{bmatrix}$$



$$\begin{aligned} \bar{v}_{No} &= \frac{1}{3} \bar{v}_{uo} \\ &= \frac{A}{3} \cos \theta \\ &= \frac{1}{2} v_{uN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{v}_{uo} &= \frac{t_2 - t_3}{T} \cdot \frac{E_d}{2} \\ &= \frac{A}{\sqrt{3}} \left[2 \cos \frac{\pi}{6} \cdot \sin \left(\frac{\pi}{2} - \theta \right) \right] = A \cos \theta \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{v}_{vo} &= \frac{t_2 + t_3}{T} \cdot \frac{E_d}{2} \\ &= \frac{A}{\sqrt{3}} \left[2 \sin \frac{\pi}{6} \cdot \cos \left(\frac{\pi}{2} - \theta \right) \right] = \frac{A}{\sqrt{3}} \sin \theta \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{v}_{wo} &= -\frac{(t_2 + t_3)}{T} \cdot \frac{E_d}{2} \\ &= -\bar{v}_{vo} = -\frac{A}{\sqrt{3}} \sin \theta \end{aligned}$$

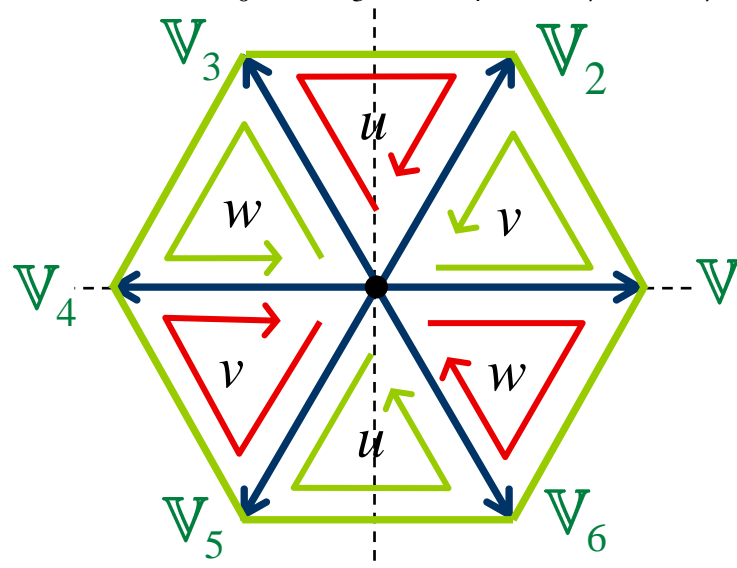
สำหรับ Sector 3 $[V_3, V_4, V_0, V_7]$ Sequence: $V_0 \rightarrow V_3 \rightarrow V_4 \rightarrow V_7 \rightarrow V_7 \rightarrow V_4 \rightarrow V_3 \rightarrow V_0$

$$\bar{v}_{uo} = +\frac{A}{\sqrt{3}} \cos\left(\theta + \frac{\pi}{6}\right)$$

$$\bar{v}_{vo} = -\frac{A}{\sqrt{3}} \cos\left(\theta + \frac{\pi}{6}\right) = -\bar{v}_{uo}$$

$$\bar{v}_{wo} = A \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$\bar{v}_{No} = \frac{A}{3} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) = \frac{1}{2} v_{wN}$$



สำหรับ Sector 4

$$\bar{v}_{uo} = +\frac{A}{\sqrt{3}} \cos\left(\theta - \frac{\pi}{6}\right)$$

$$\bar{v}_{vo} = A \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$\bar{v}_{wo} = -\frac{A}{\sqrt{3}} \cos\left(\theta - \frac{\pi}{6}\right) = -\bar{v}_{uo}$$

$$\bar{v}_{No} = \frac{A}{3} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) = \frac{1}{2} v_{vN}$$

สำหรับ Sector 5

$$\bar{v}_{uo} = A \cos \theta$$

$$\bar{v}_{vo} = \frac{A}{\sqrt{2}} \sin \theta$$

$$\bar{v}_{wo} = -\frac{A}{\sqrt{3}} \sin \theta = -\bar{v}_{uo}$$

$$\bar{v}_{No} = \frac{A}{3} \cos \theta = \frac{1}{2} v_{uN}$$

สำหรับ Sector 6

$$\bar{v}_{uo} = \frac{A}{\sqrt{3}} \cos\left(\theta + \frac{\pi}{6}\right)$$

$$\bar{v}_{vo} = -\frac{A}{\sqrt{3}} \cos\left(\theta + \frac{\pi}{6}\right) = -\bar{v}_{uo}$$

$$\bar{v}_{wo} = A \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$\bar{v}_{No} = \frac{A}{3} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) = \frac{1}{2} v_{wN}$$

สรุป แรงดัน Zero Vector \bar{v}_{No} ที่บวกเข้าไปใน (v_{uN}, v_{vN}, v_{wN}) จะเปลี่ยนไปตามสมการ

$$\bar{v}_{No} = \frac{1}{2} \text{Median}(v_{uN}, v_{vN}, v_{wN})$$

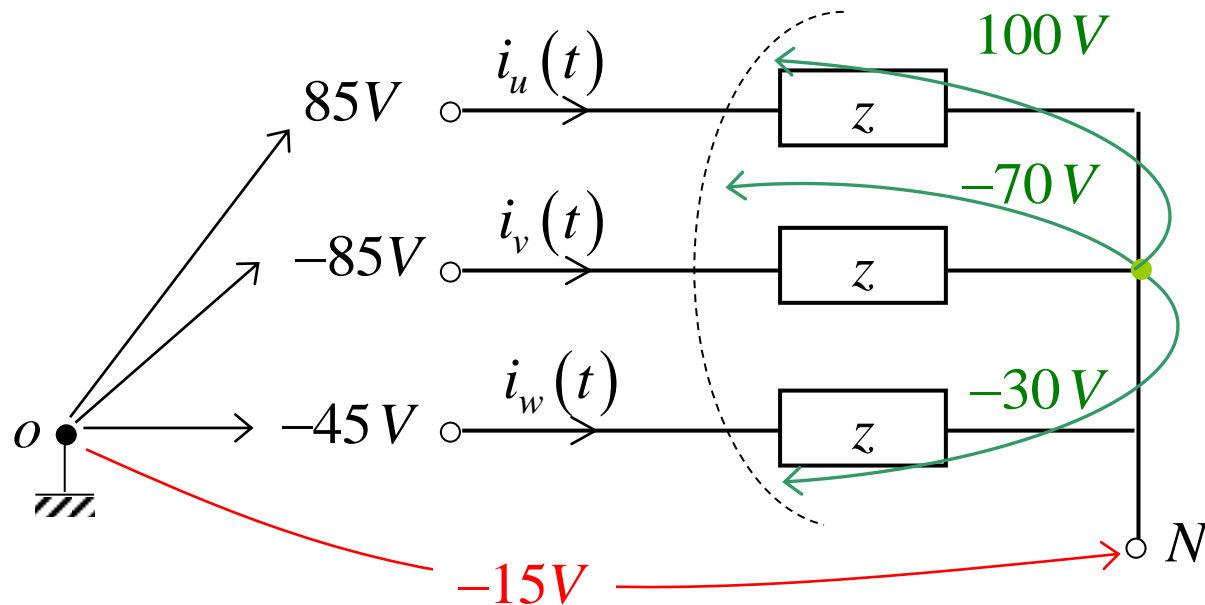
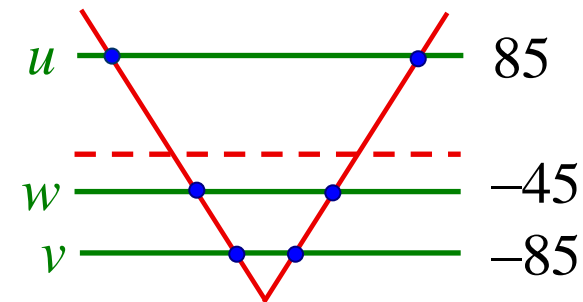
$$\bar{v}_{uo} = v_{uN} + \bar{v}_{No}$$

$$\bar{v}_{vo} = v_{vN} + \bar{v}_{No}$$

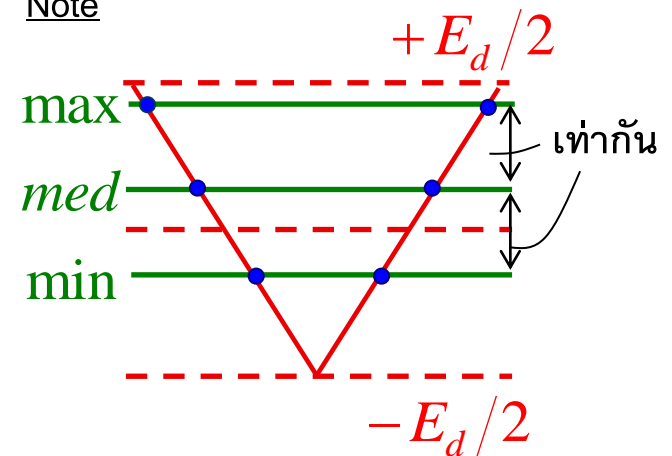
$$\bar{v}_{wo} = v_{wN} + \bar{v}_{No}$$

Ex ต้องการสร้าง $\begin{cases} v_{uN} = 100V \\ v_{vN} = -70V \\ v_{wN} = -30V \end{cases} \rightarrow \bar{v}_{No} = \frac{1}{2}(-30) = -15V$

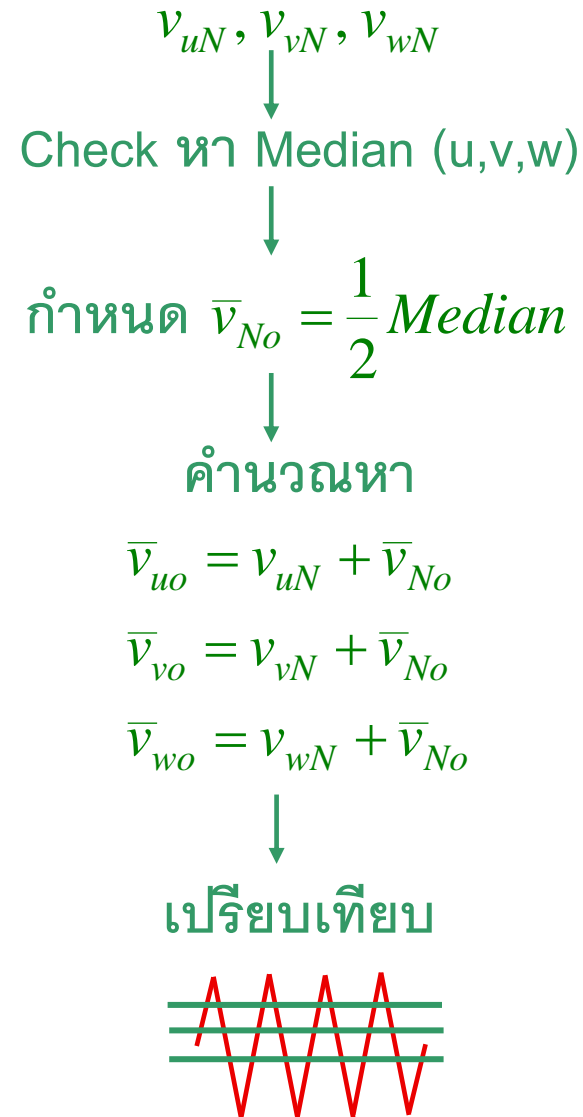
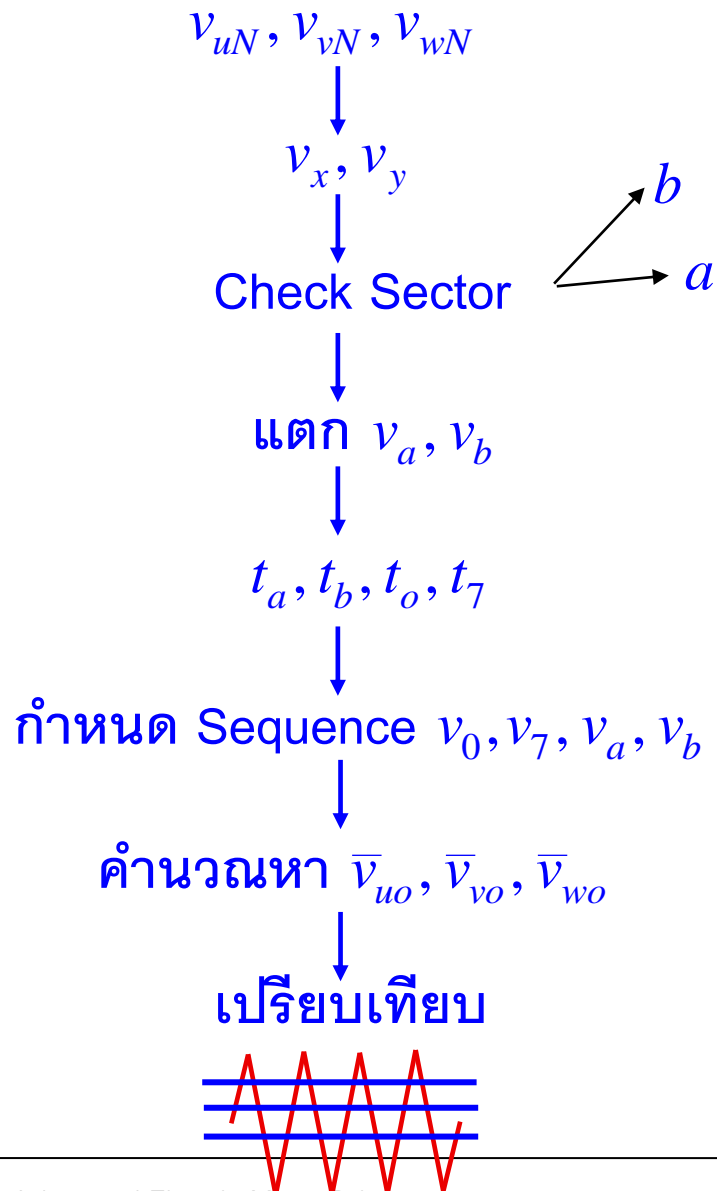
$$\therefore \begin{cases} v_{uo} = 100 + (-15) = 85 \\ v_{vo} = -70 + (-15) = -85 \\ v_{wo} = -30 + (-15) = -45 \end{cases}$$



Note



เปรียบเทียบการทำ Space Vector PWM



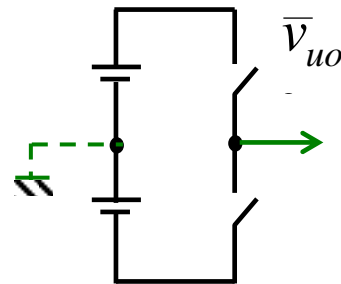
ต้องการสร้าง

$$\begin{bmatrix} v_{uN}^*(t) \\ v_{vN}^*(t) \\ v_{wN}^*(t) \end{bmatrix}$$

Sinusoidal
PWM

$$\begin{bmatrix} \bar{v}_{uo}(t) = v_{uN}^*(t) \\ \bar{v}_{vo}(t) = v_{vN}^*(t) \\ \bar{v}_{wo}(t) = v_{wN}^*(t) \end{bmatrix}$$

$$\underline{v}^*(t)$$



คิดแยกทีละเฟส

**: command*

$$\begin{bmatrix} \bar{v}_{u0}(t) \\ \bar{v}_{v0}(t) \\ \bar{v}_{w0}(t) \end{bmatrix}$$

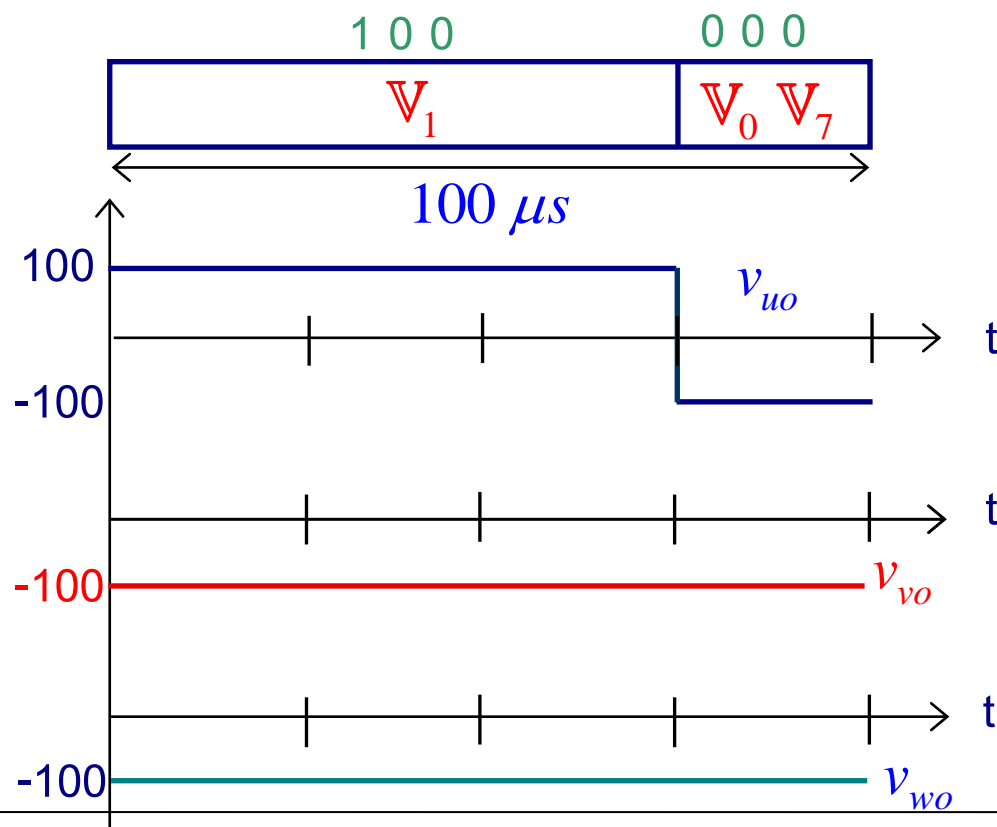
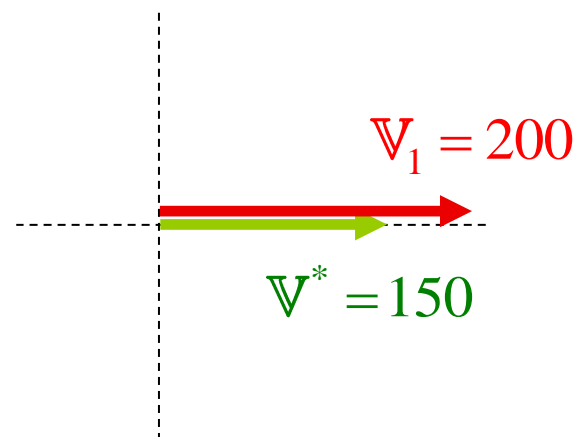
$$\underline{\bar{v}}(t) = \underline{v}^*(t)$$

$$\begin{cases} \bar{v}_{uN}(t) = v_{uN}^*(t) \\ \bar{v}_{vN}(t) = v_{vN}^*(t) \\ \bar{v}_{wN}(t) = v_{wN}^*(t) \end{cases}$$

[ex] $E_d = 200\text{ V}, \quad T = 100\mu\text{s} \quad [f_{sw} = 10\text{kHz}]$

ต้องการ
$$\begin{cases} v_{uN} = 100\text{ V} \\ v_{vN} = -50\text{ V} \\ v_{wN} = -50\text{ V} \end{cases} \Rightarrow \mathbb{V}^* = \begin{bmatrix} 150 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$(\sum = 0)$



$$\begin{cases} \bar{v}_{uo} = 50\text{ V} \\ \bar{v}_{vo} = -100\text{ V} \\ \bar{v}_{wo} = -100\text{ V} \end{cases}$$

$$\bar{v}_{No} = -50\text{ V}$$

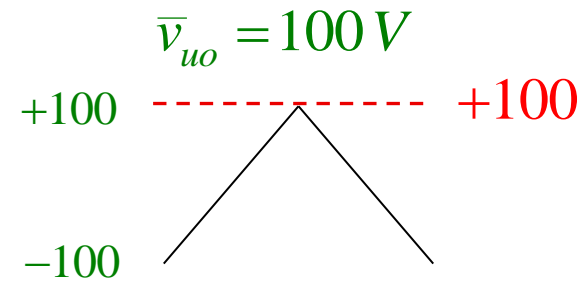
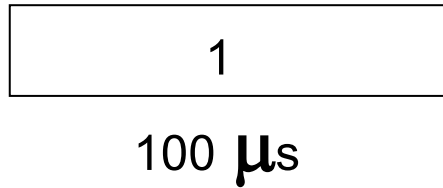
$$\begin{cases} \bar{v}_{uN} = 100\text{ V} \\ \bar{v}_{vN} = -50\text{ V} \\ \bar{v}_{wN} = -50\text{ V} \end{cases}$$

Note

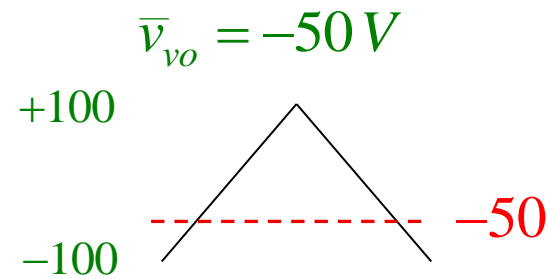
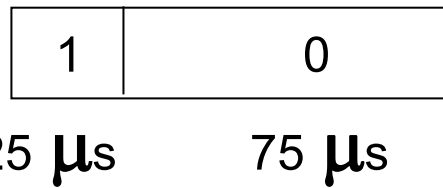
ไม่เท่ากัน !!

แบบ PWM เดิม

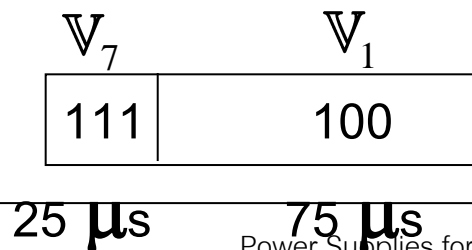
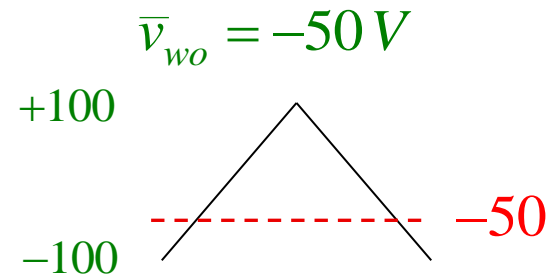
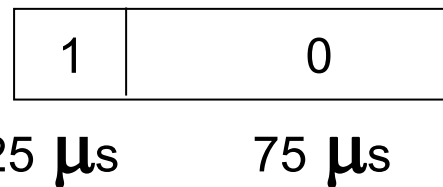
- $v_{uN} = 100$



- $v_{vN} = -50$



- $v_{wN} = -50$



$\bar{v}_{No} = 0$

เงื่อนไขแรงดันในแต่ละ Sector

Sector 1

U	$U > 0$
V	$V > 0$ หรือ $V < 0$ ก็ได้ แต่ $W < V < U$
W	$W < 0$

Sector 2

V
U
W

Sector 3

V
W
U

Sector 4

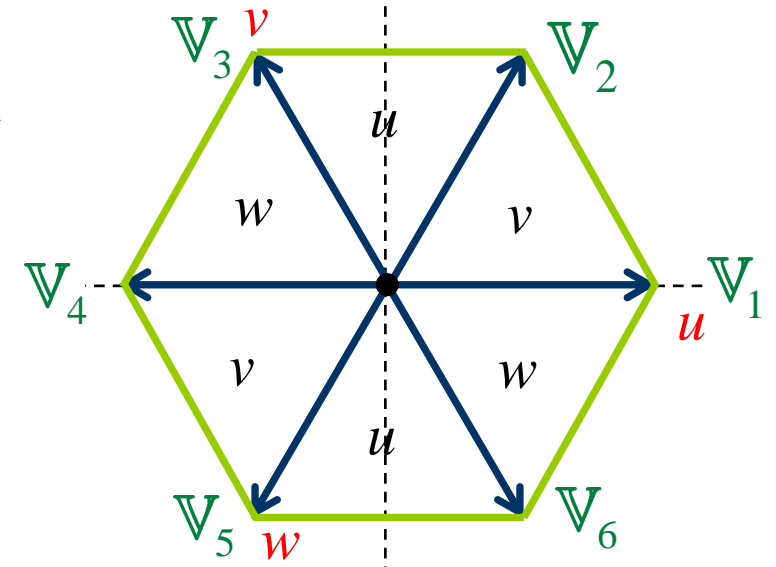
W
V
U

Sector 5

W
U
V

Sector 6

U
W
V



Note: ในกรณีที่

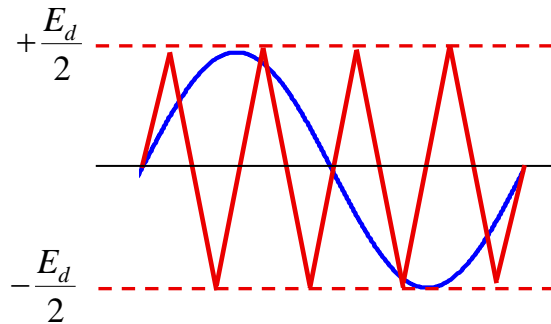
$v_{uN} + v_{vN} + v_{wN} \neq 0$, การทำ space vector PWM จะได้

General Form:

$$\bar{v}_{No} = -\frac{1}{2} [\max(v_{uN}, v_{vN}, v_{wN}) + \min(v_{uN}, v_{vN}, v_{wN})]$$

กรณีที่กำลังเป็น Sinusoid

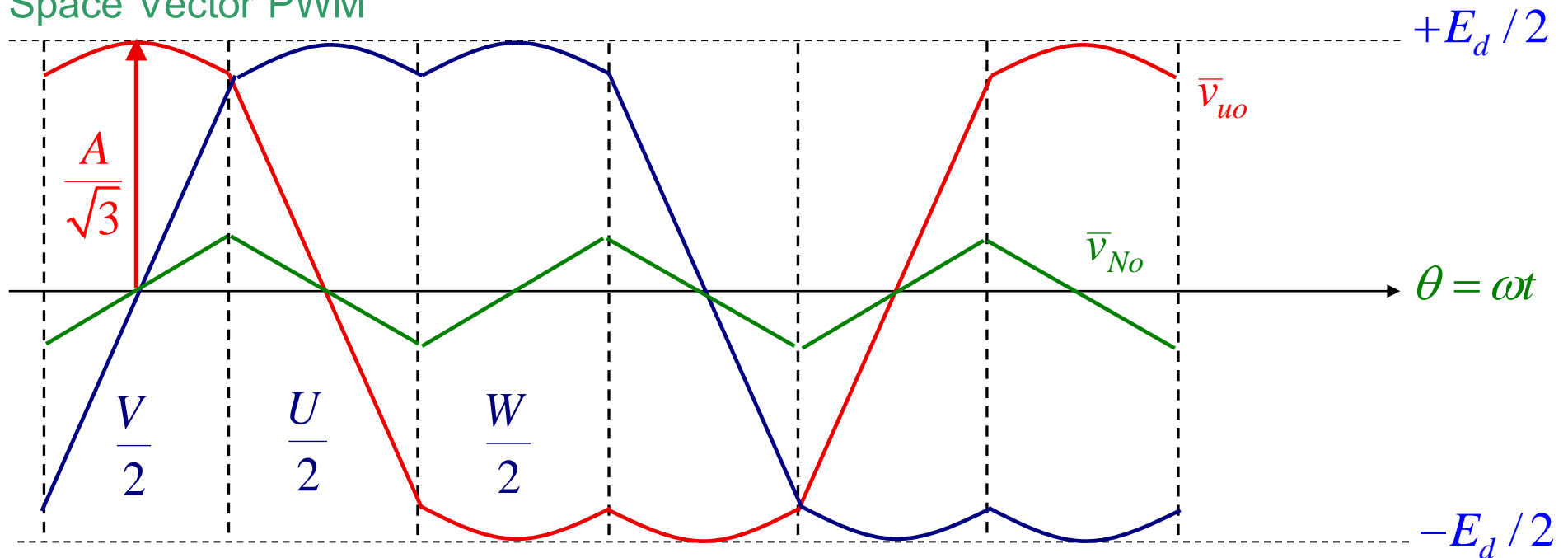
● Sinusoidal PWM



Max. modulation index $a=1$

Peak $v_{un} = \boxed{\frac{E_d}{2}}$

● Space Vector PWM



$$v_{uN} = \frac{2}{3} A \cdot \cos \theta$$

$$\therefore \max \frac{A}{\sqrt{3}} = \frac{E_d}{2}$$

$$\therefore A = \frac{\sqrt{3}}{2} E_d$$

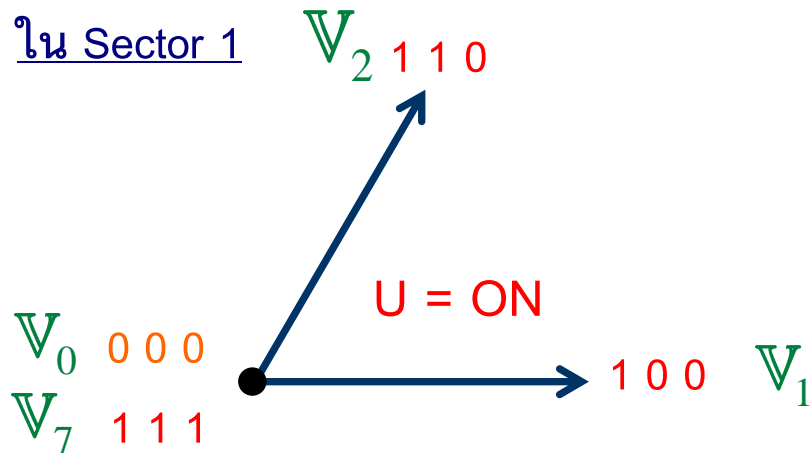
$$\text{Peak } v_{uN} = \frac{2}{3} \times \frac{\sqrt{3}}{2} E_d = \boxed{\frac{E_d}{\sqrt{3}}}$$

$$\begin{aligned} \bar{v}_{u0} &= \frac{A}{\sqrt{3}} \cdot \cos \left(\theta - \frac{\pi}{6} \right) && ; 0 < \theta < \frac{\pi}{3} \\ &= A \cdot \cos \theta && ; \frac{\pi}{3} < \theta < \frac{2\pi}{3} \\ &= \frac{A}{\sqrt{3}} \cdot \cos \left(\theta + \frac{\pi}{6} \right) && ; \frac{2\pi}{3} < \theta < \pi \\ &= \frac{A}{\sqrt{3}} \cdot \cos \left(\theta - \frac{\pi}{6} \right) && ; \pi < \theta < \frac{4\pi}{3} \\ &= A \cdot \cos \theta && ; \frac{4\pi}{3} < \theta < \frac{5\pi}{3} \\ &= \frac{A}{\sqrt{3}} \cdot \cos \left(\theta + \frac{\pi}{6} \right) && ; \frac{5\pi}{3} < \theta < 2\pi \end{aligned}$$

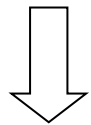
2 arms modulation

ใน 1 คาบ carrier wave จะมีเพียง 2 arms
(เฟส) เท่านั้นที่มีการสวิตช์

ใน Sector 1

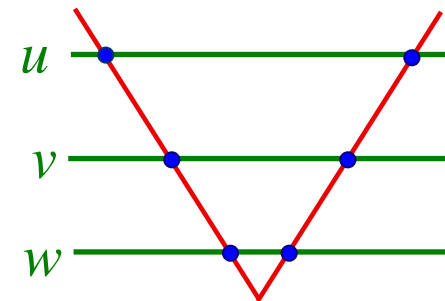
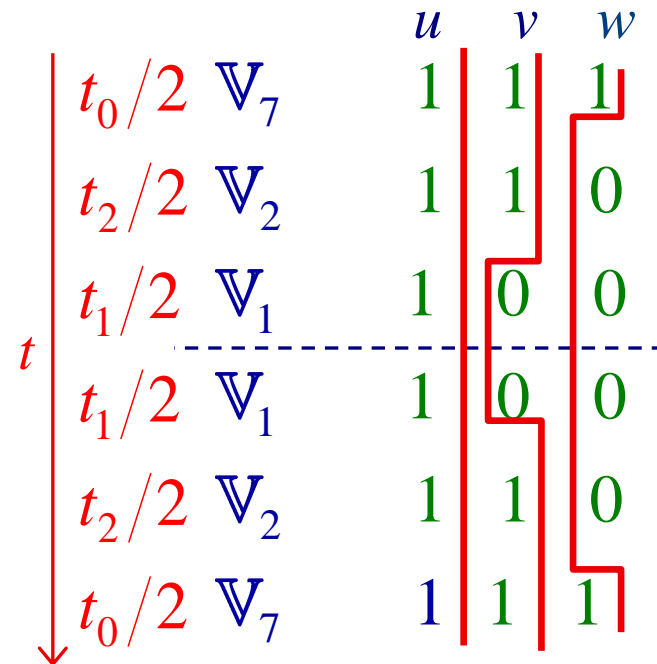


เดิม : $V_0 - V_1 - V_2 - V_7 - V_7 - V_2 - V_1 - V_0$



เลือกใช้เฉพาะ V_7 ไม่ใช่ V_0

$V_7 - V_2 - V_1 - V_1 - V_2 - V_7$



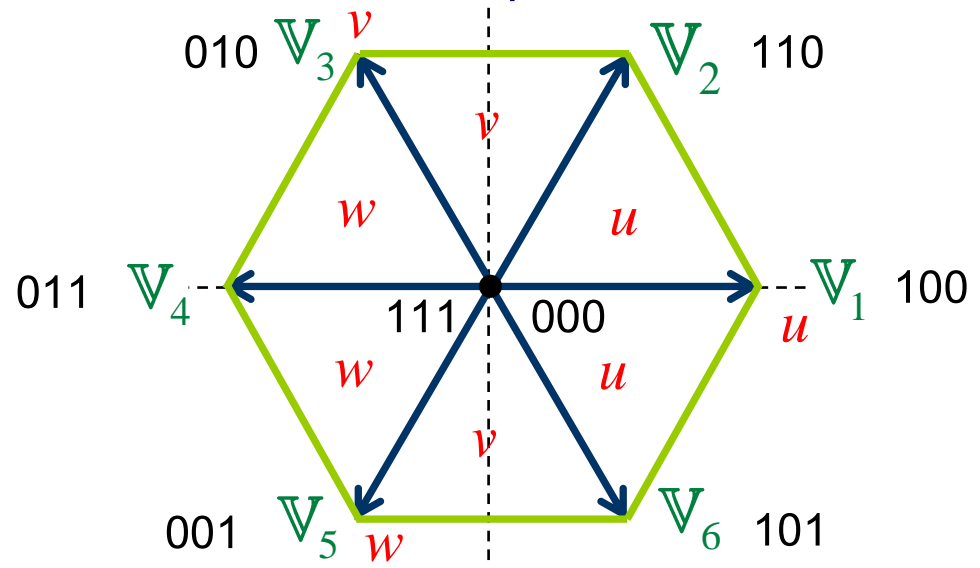
$$\bar{v}_{uo} = +\frac{E_d}{2}$$

$$\begin{aligned}\bar{v}_{vo} &= \frac{E_d}{2} - 2 \cdot \frac{t_1}{T} \cdot \frac{E_d}{2} \\ &= \frac{E_d}{2} - \frac{2A}{\sqrt{3}E_d} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta\right) \cdot E_d \\ &= \frac{E_d}{2} + \underbrace{\frac{2A}{\sqrt{3}} \cdot \cos\left(\theta - \frac{5\pi}{6}\right)}_{v_{vN} - v_{uN}}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{v}_{wo} &= \frac{E_d}{2} - 2 \cdot \frac{(t_1 + t_2)}{T} \cdot \frac{E_d}{2} \\ &= \frac{E_d}{2} + \underbrace{\frac{2A}{\sqrt{3}} \cdot \cos\left(\theta + \frac{5\pi}{6}\right)}_{v_{wN} - v_{uN}}\end{aligned}$$

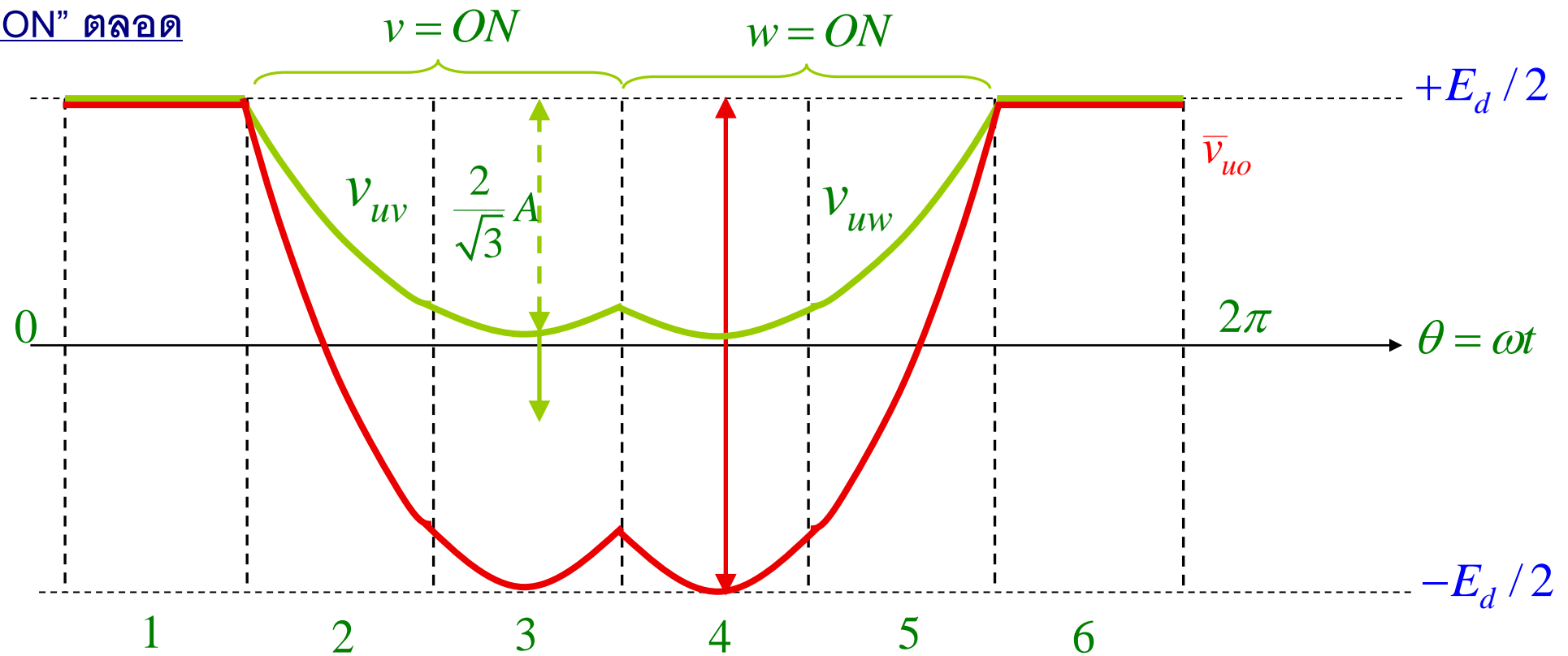
$$\bar{v}_{No} = \frac{E_d}{2} - \underbrace{\frac{2}{3}A \cos \theta}_{v_{uN}}$$

คิดในทำนองเดียวกันในทุก Sector



$$\text{Sector 2} \left\{ \begin{aligned}\bar{v}_{uo} &= \frac{E_d}{2} + \underbrace{v_{uN} - v_{vN}}_{\frac{2A}{\sqrt{3}} \cos\left(\theta + \frac{\pi}{6}\right)} \\ \bar{v}_{vo} &= \frac{E_d}{2} \\ \bar{v}_{wo} &= \frac{E_d}{2} + v_{wN} - v_{vN} \\ \bar{v}_{No} &= \frac{E_d}{2} - v_{vN}\end{aligned}\right.$$

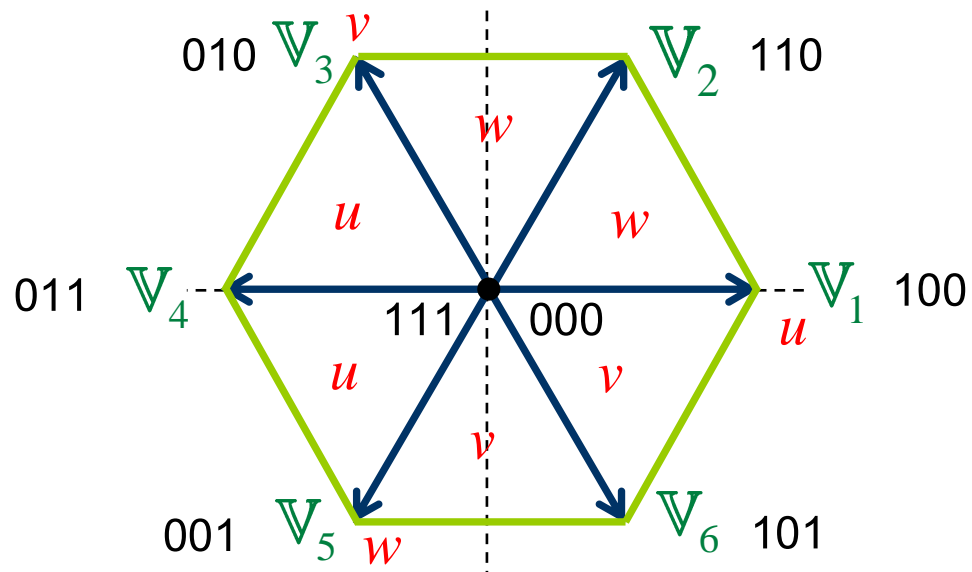
“ON” ตลอด



ที่ max. modulation $\frac{2A}{\sqrt{3}} = E_d \rightarrow A = \frac{\sqrt{3}}{2} E_d$

\therefore ค่า Peak $v_{uN} = \frac{2}{3}A = \boxed{\frac{E_d}{\sqrt{3}}}$

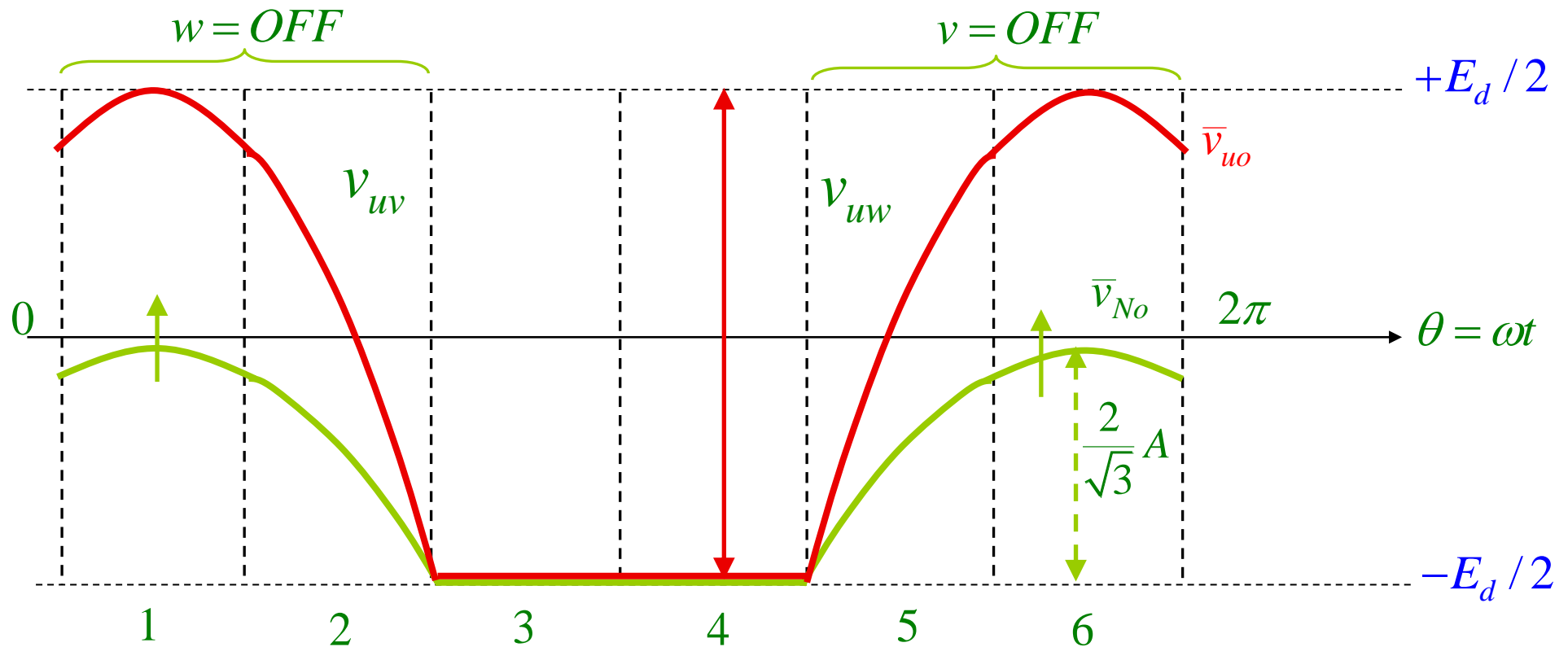
“OFF” 状態



$$V_0 - V_1 - V_2 - V_2 - V_1 - V_0$$

Sector 1

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{v}_{uo} = -\frac{E_d}{2} + v_{uN} - v_{wN} \\ \bar{v}_{vo} = -\frac{E_d}{2} + v_{vN} - v_{wN} \\ \bar{v}_{wo} = -\frac{E_d}{2} \\ \bar{v}_{No} = -\frac{E_d}{2} - v_{wN} \end{array} \right.$$



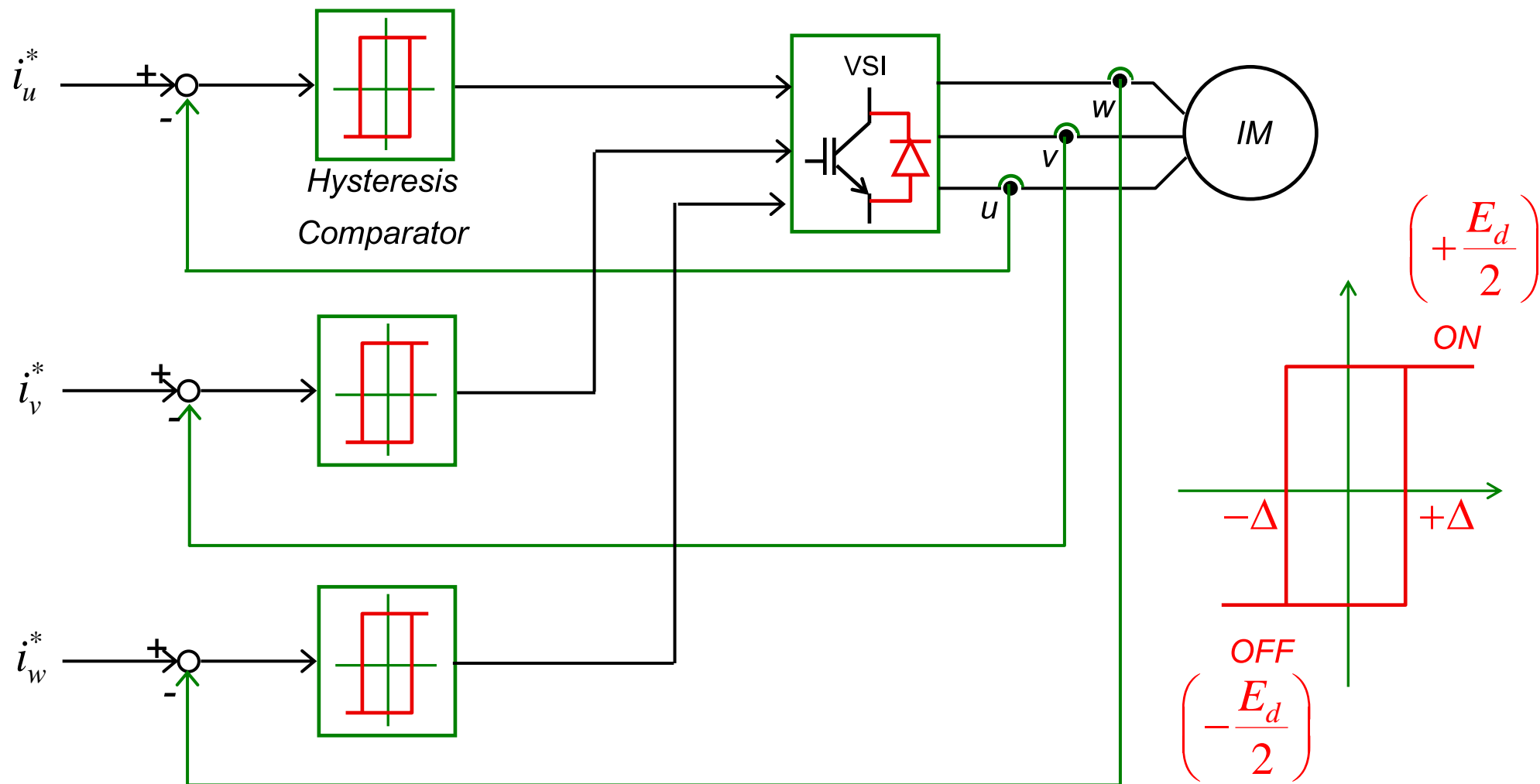
สรุป 2 arms modulation

กรณี “ON” ตลอด $\bar{v}_{No} = \frac{E_d}{2} - \max[v_{uN}, v_{vN}, v_{wN}]$

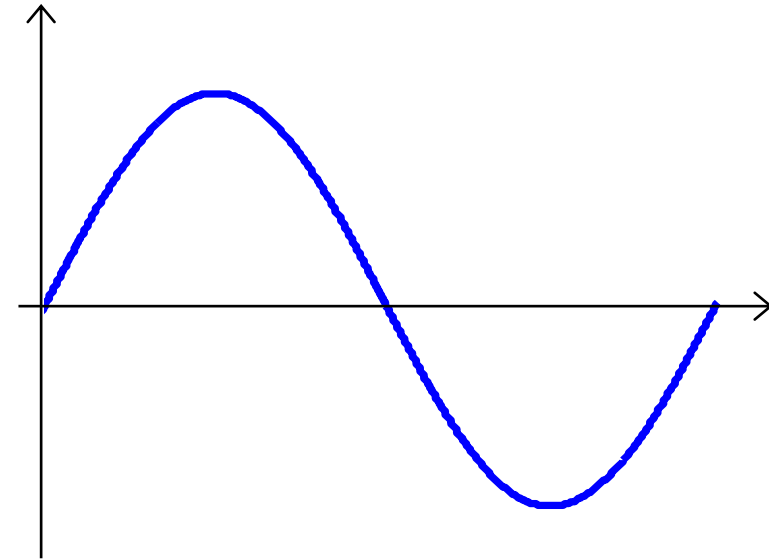
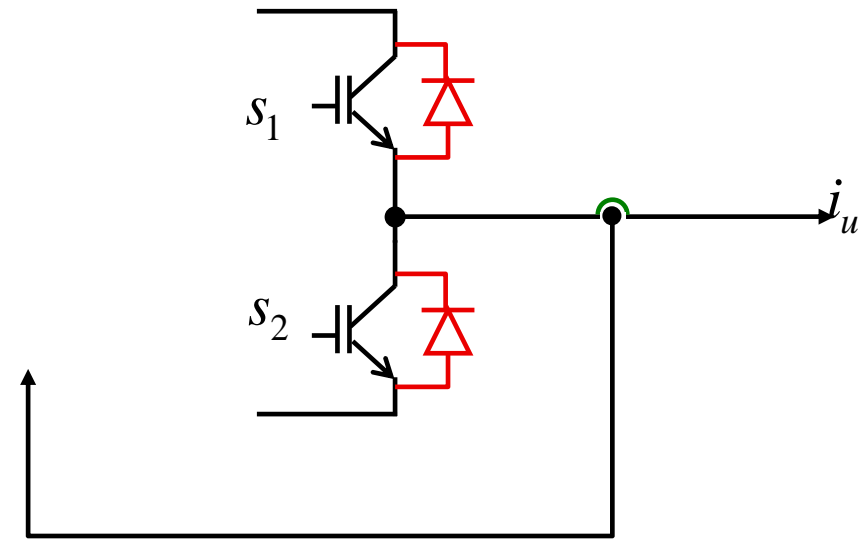
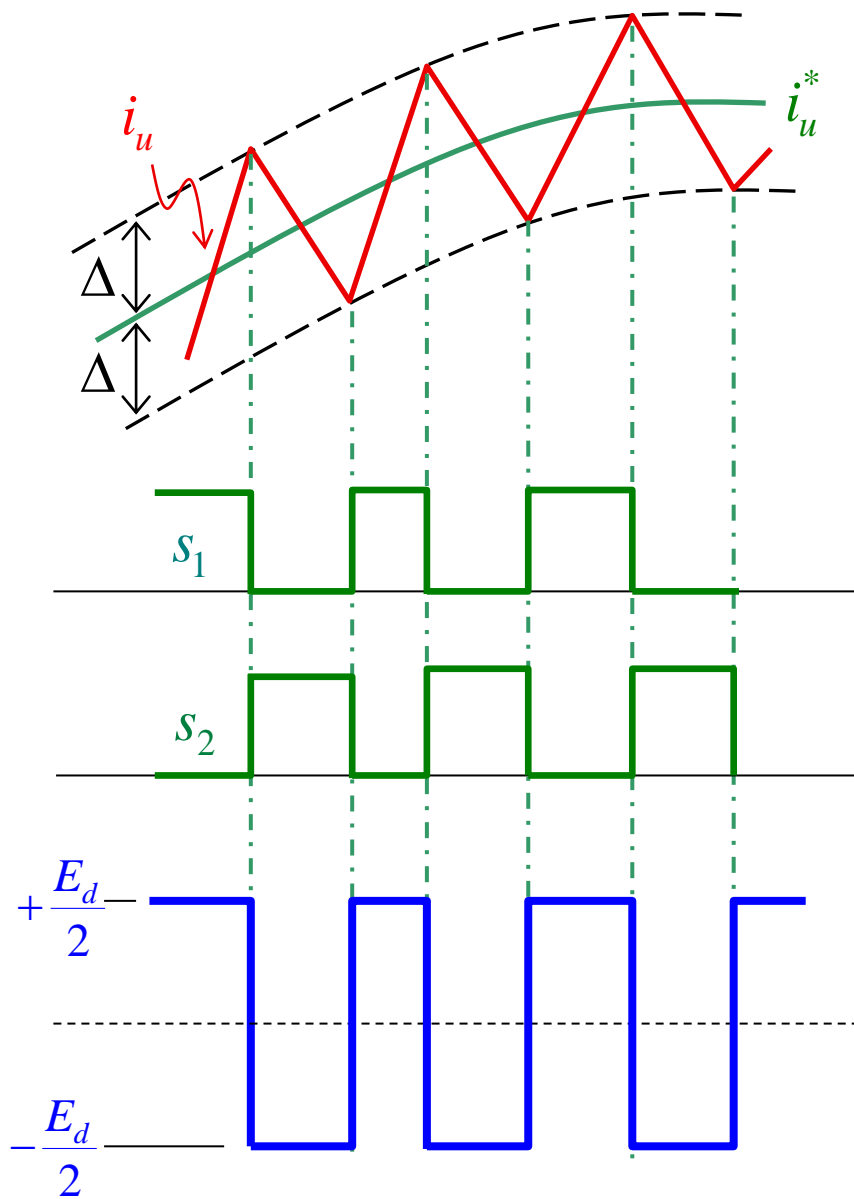
กรณี “OFF” ตลอด $\bar{v}_{No} = -\frac{E_d}{2} - \min[v_{uN}, v_{vN}, v_{wN}]$

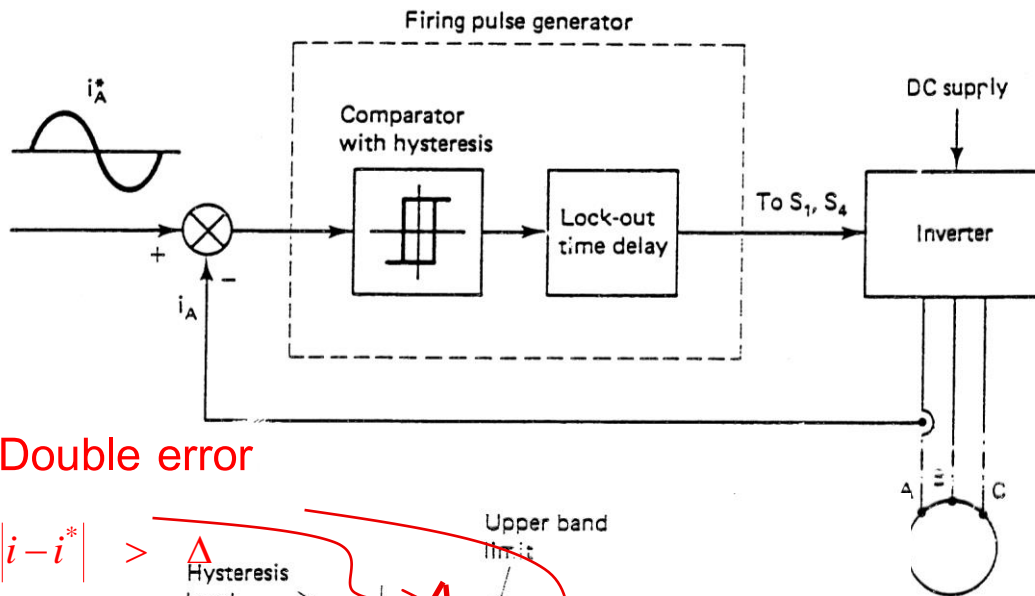
Current-Controlled (Regulated) Inverter (CCI, CRI)

1) Hysteresis Current Control

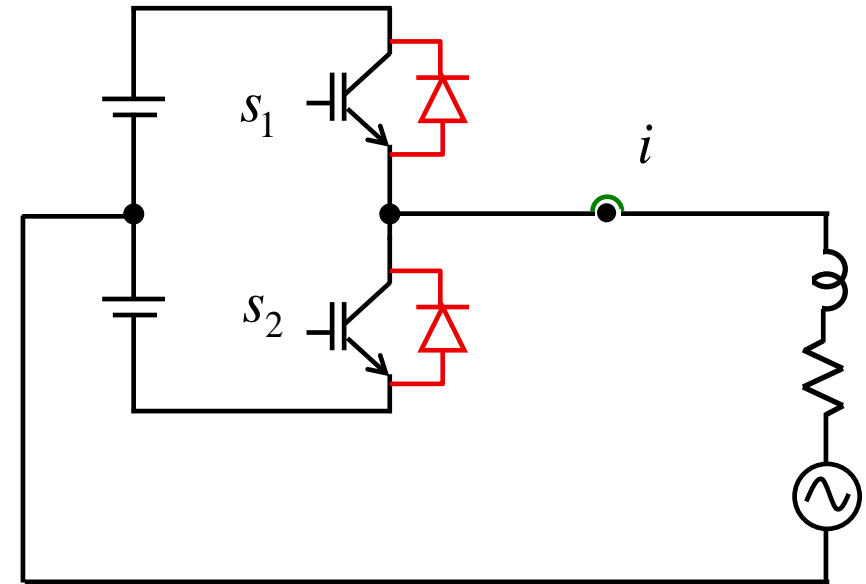
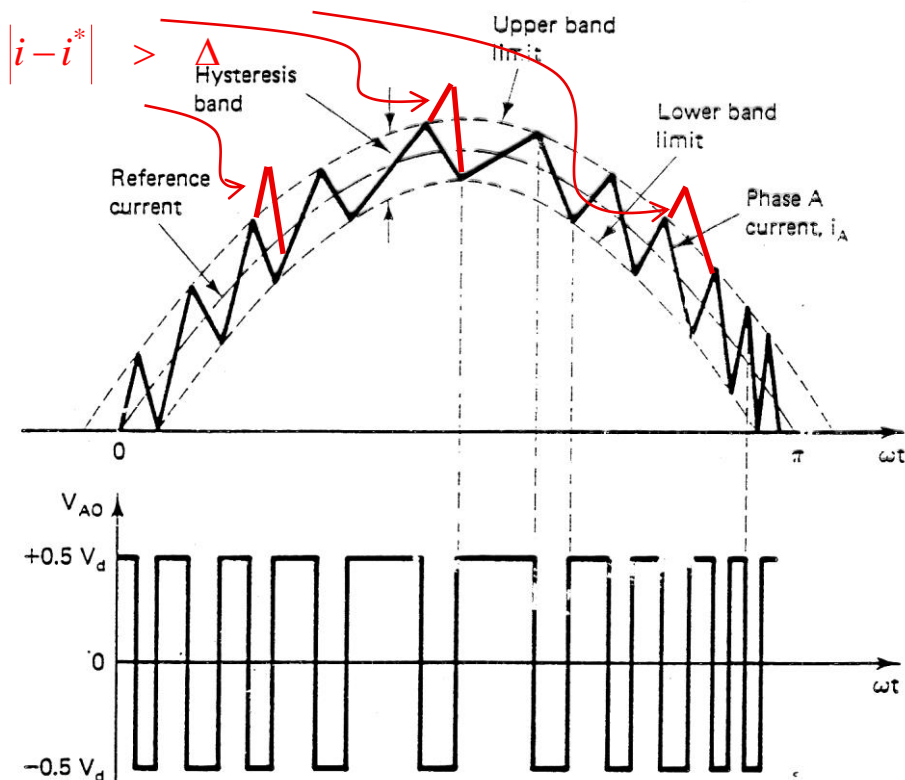


- ไม่มีการทำ PWM
- สัญญาณออกของ Hysteresis Comparator เป็น Switching Signal โดยตรง
- ไม่มี Carrier Frequency..... Switching Frequency ไม่คงที่
- เหมาะกับ Analog มากกว่า Digital
- Response เร็ว





Double error



ถ้าเป็น single phase

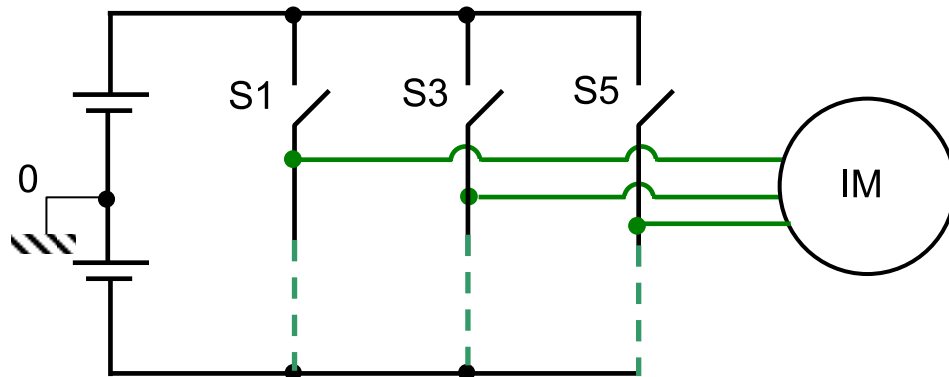
- Error ของ กระแส

$$|i - i^*| \leq \Delta$$

แต่ในกรณี 3 phase

$$- |i - i^*| \leq 2\Delta$$

- กรณี 3 ϕ ถึงแม้ S1=ON ก็ไม่ได้หมายความว่ากระแสในเฟส u จะเพิ่ม ... ถ้า S2 = S5 = ON ด้วย \rightarrow Zero Vector \rightarrow กระแสควบคุมไม่ได้



เปลี่ยนแปลงตามแรงเคลื่อน
เหนี่ยวนำภายในมอเตอร์

อาจทะลุเกิน Band ของ
Hysteresis Comparator ได้

Ex. Inverter อยู่ในสถานะ “0 1 1” แล้ว i_u ลดลงจนขอบ Hysteresis \rightarrow Inverter เปลี่ยนสถานะเป็น “1 1 1” ที่ $t = t_o$

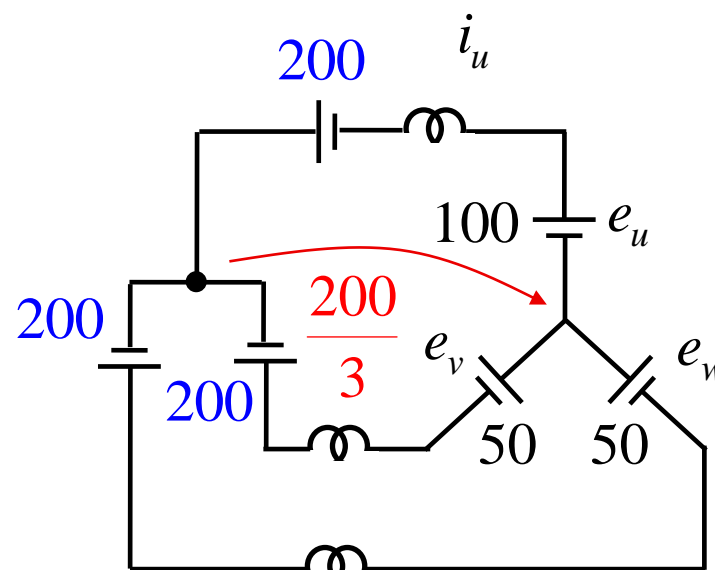
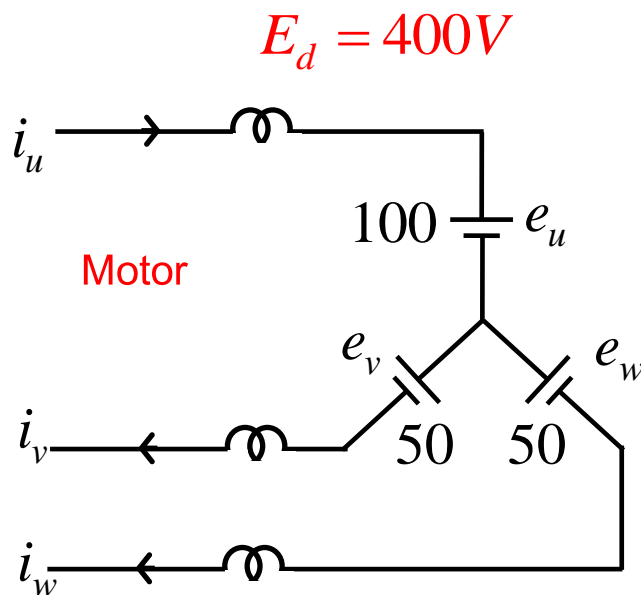
$$t = t_o \begin{cases} i_u = 2 - \Delta \\ i_v = -1 + \Delta/2 \\ i_w = -1 + \Delta/2 \end{cases}$$

$$\begin{cases} i_u^* = 2 \\ i_v^* = -1 \\ i_w^* = -1 \end{cases}$$

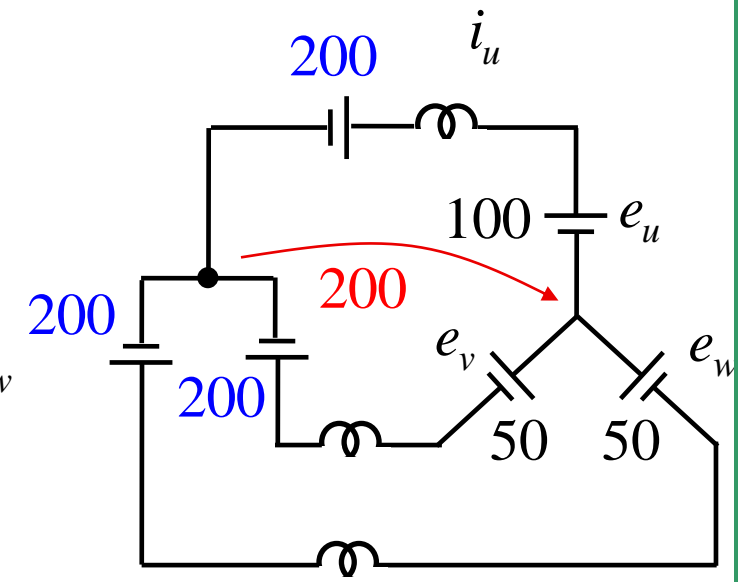
$$e_u = 100$$

$$e_v = -50$$

$$e_w = -50$$



“011”



“111”

$$\frac{d i_u}{dt} = \frac{1}{L} \left(-\frac{800}{3} - 100 \right)$$

$$\frac{d i_v}{dt} = \frac{1}{L} \left(+\frac{400}{3} + 50 \right)$$

$$\frac{d i_w}{dt} = \frac{1}{L} \left(+\frac{400}{3} + 50 \right)$$

 \Rightarrow

$$\frac{d i_u}{dt} = -\frac{1}{L} 100$$

$$\frac{d i_v}{dt} = \frac{1}{L} \cdot 50$$

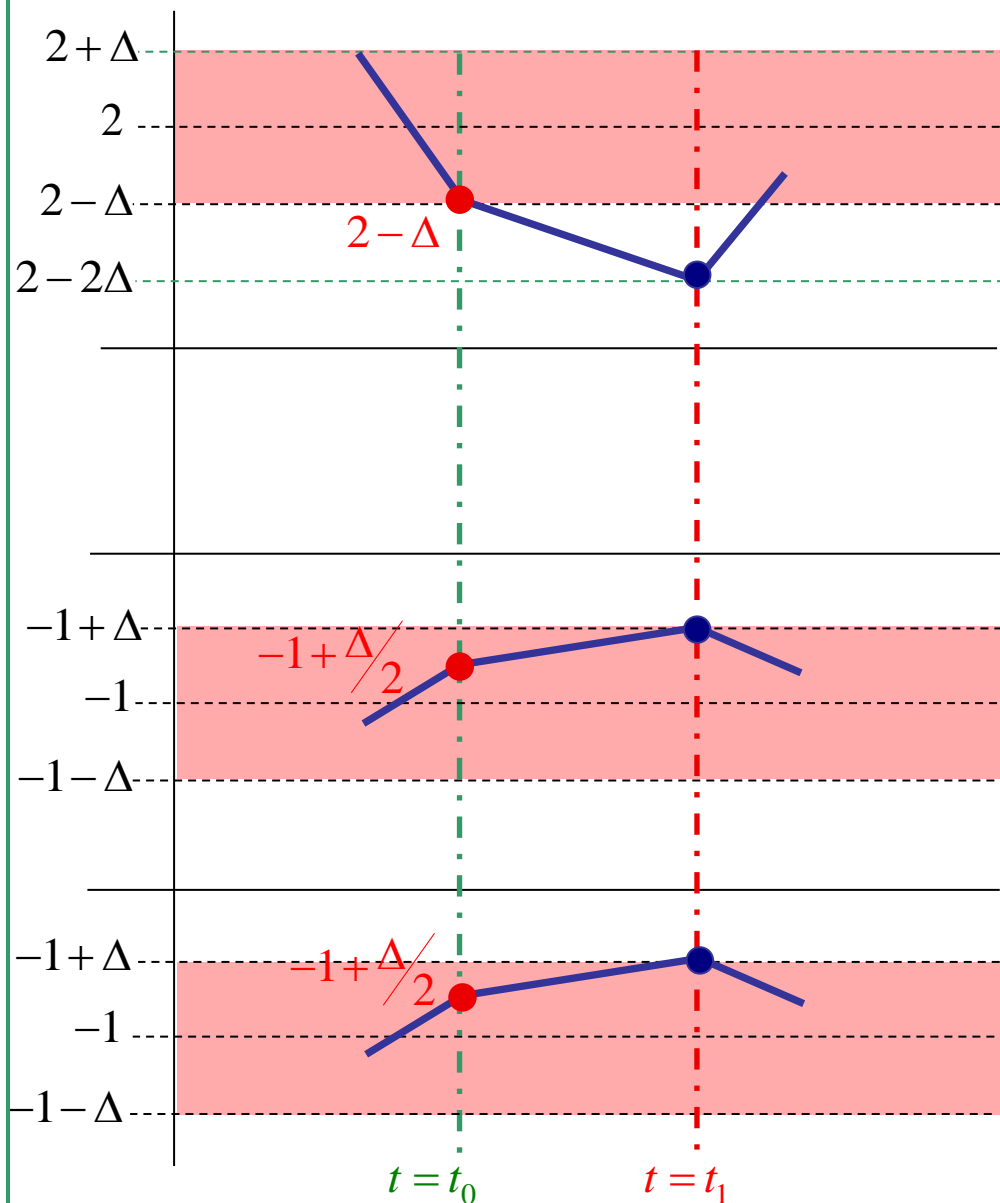
$$\frac{d i_w}{dt} = \frac{1}{L} \cdot 50$$

$$0 \leq t \leq t_o$$

“011”

$$t > t_o$$

“111”



ที่ $t = t_1$ “100”

- i_w, i_v เพิ่มขึ้น $\frac{\Delta}{2}$

$$\left(-1 + \frac{\Delta}{2} \rightarrow -1 + \Delta \right)$$

- i_u ลดลง Δ

$$(+2 - \Delta \rightarrow +2 - 2\Delta)$$

ที่ $t > t_1$

$$\frac{d i_u}{dt} = + \frac{1}{L} \left(\frac{800}{3} - 100 \right)$$

$$\frac{d i_v}{dt} = \frac{1}{L} \left(-\frac{400}{3} + 50 \right)$$

$$\frac{d i_w}{dt} = \frac{1}{L} \left(-\frac{400}{3} + 50 \right)$$

Current Error ใน Space Vector

สมการของ Error :

$$\begin{cases} \Delta i_u = i_u^* - i_u \\ \Delta i_v = i_v^* - i_v \\ \Delta i_w = i_w^* - i_w \end{cases}$$

เงื่อนไข

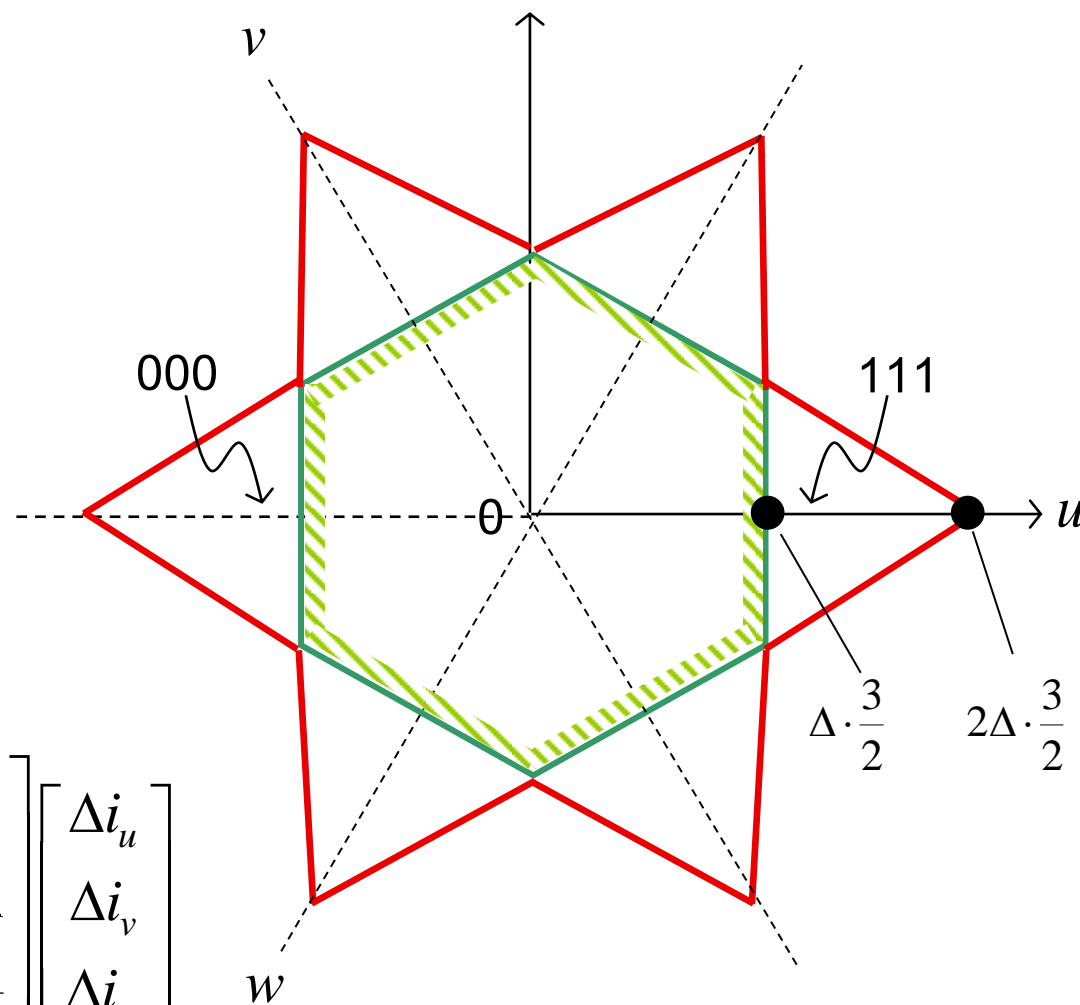
1. $\Delta i_u + \Delta i_v + \Delta i_w = 0$

2. $|\Delta i_u| < \Delta$

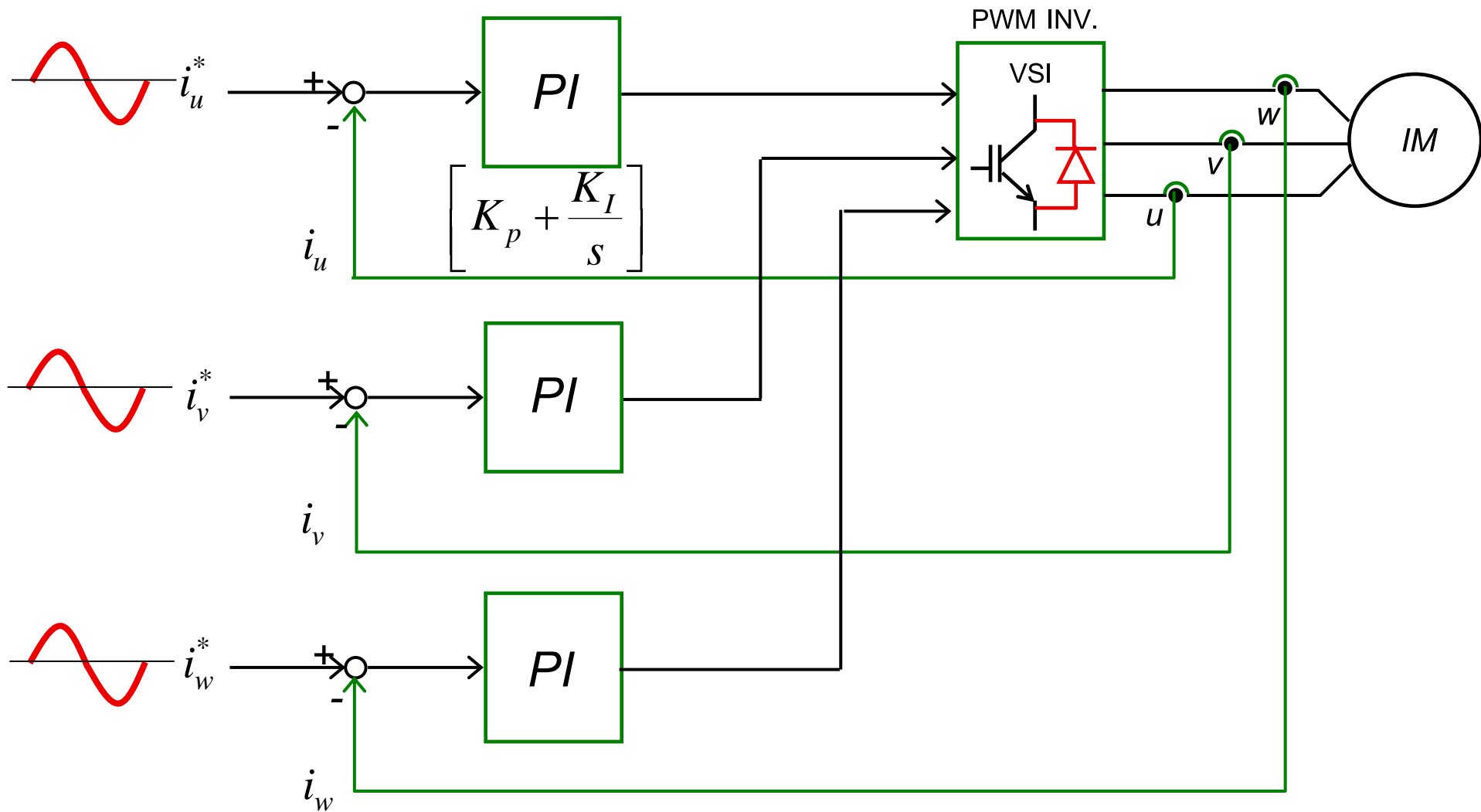
$|\Delta i_v| < \Delta$

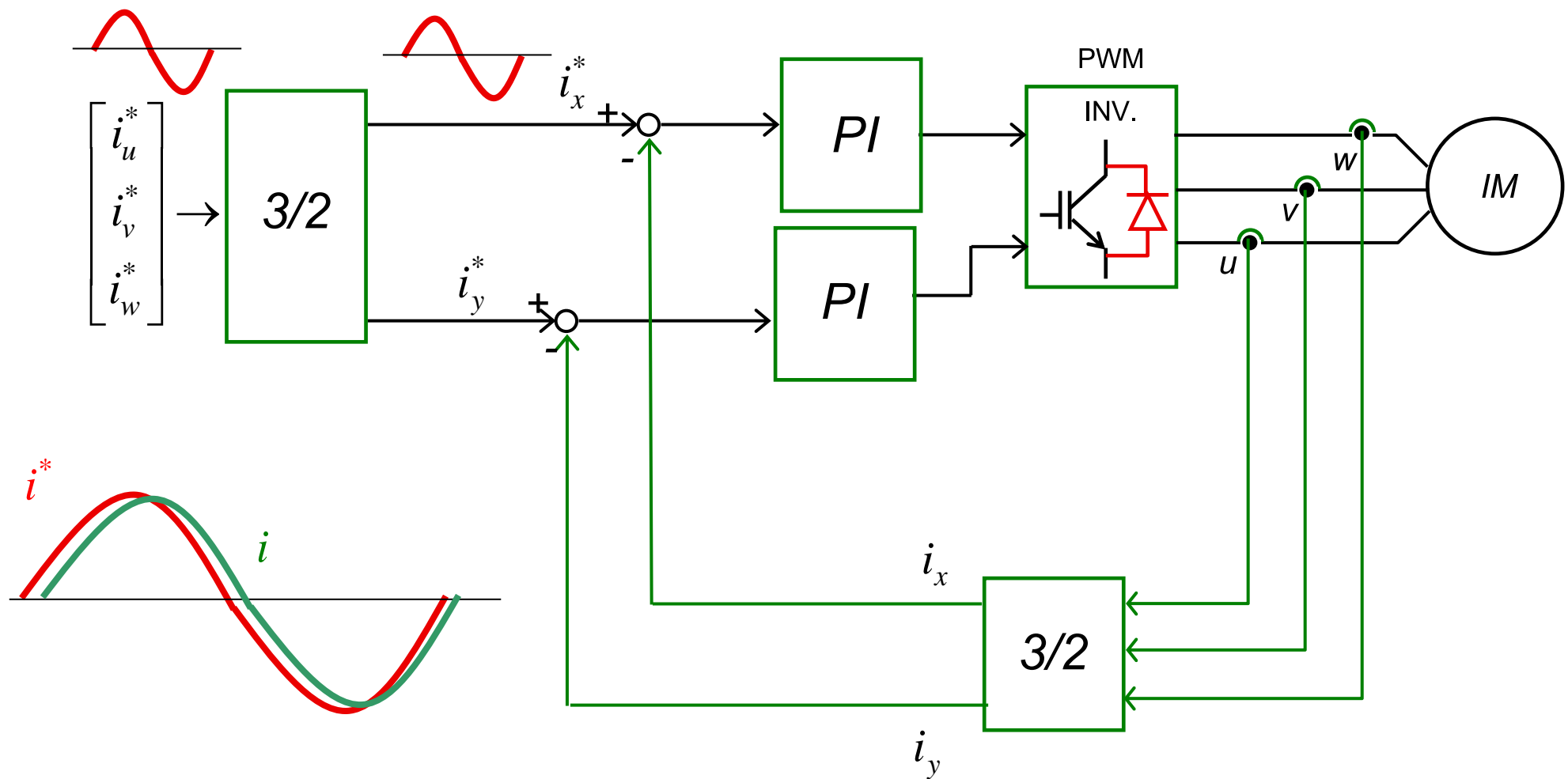
$|\Delta i_w| < \Delta$

Space Vector $\Delta \underline{i} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_u \\ \Delta i_v \\ \Delta i_w \end{bmatrix}$



PI Current Control on Stator Frame



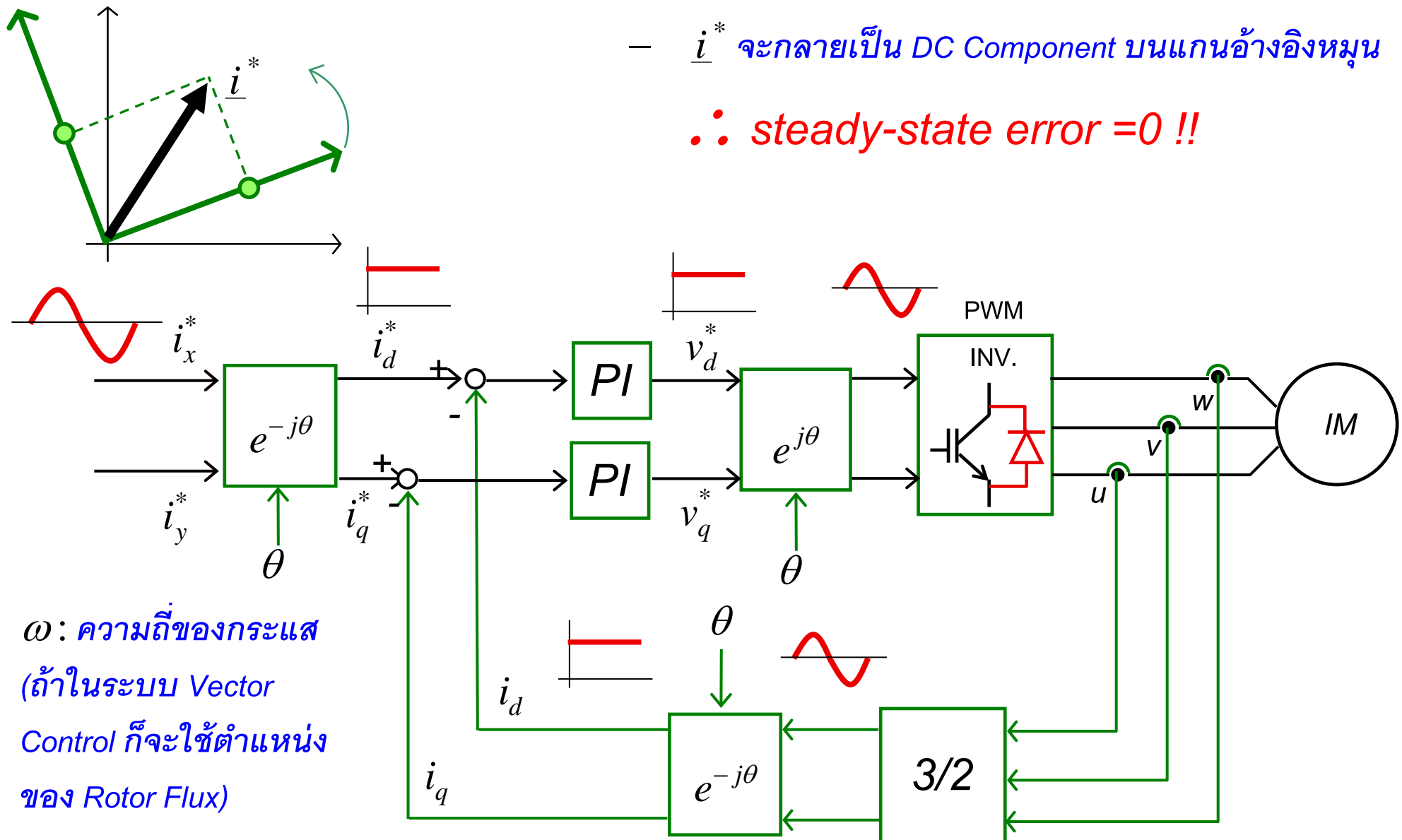


✖ : PI controller กำจัด steady-state error ได้เฉพาะกรณี $i^* = \text{DC}$

PI Current Control on Synchronously Rotating Reference Frame

— \underline{i}^* จะกลายเป็น DC Component บนแกนอ้างอิงหมุน

$\therefore \text{steady-state error} = 0 !!$



ω : ความถี่ของกระแส
(ถ้าในระบบ Vector
Control ก็จะใช้ตำแหน่ง
ของ Rotor Flux)

