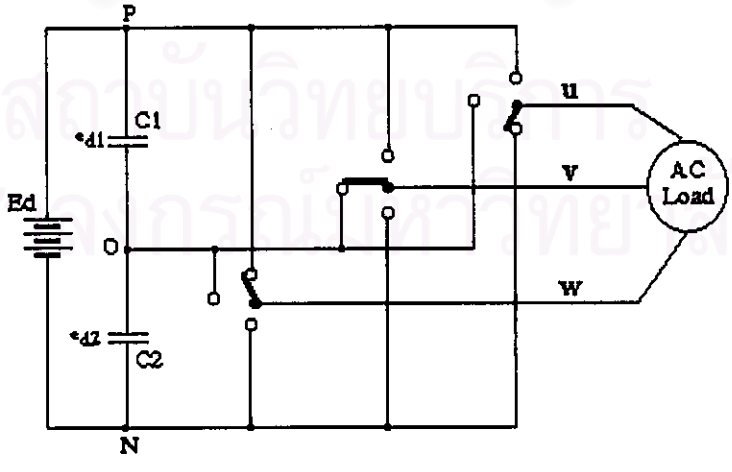
บทที่ 2
อินเวอร์เตอร์สามระดับ

ในบทนี้จะกล่าวถึงโครงสร้างและหลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์สามระดับ โดยจะอธิบายถึงวงจรอินเวอร์เตอร์สามระดับ วิธีการสวิตช์ เวกเตอร์แรงดัน และการเชื่อมต่อโหลด

โครงสร้างและหลักการทำงาน

อินเวอร์เตอร์สามระดับมีลักษณะคล้ายกับอินเวอร์เตอร์ทั่วไป(อินเวอร์เตอร์สองระดับ) ที่ต้องอาศัยแหล่งจ่ายไฟตรง หากแต่มีข้อแตกต่างกันที่อินเวอร์เตอร์ชนิดนี้ จะใช้แรงดันไฟตรง 3 ระดับอันได้จากการนำตัวเก็บประจุสองตัวมาต่ออนุกรมกันเพื่อแบ่งแรงดันบัสไฟตรง วงจรสมมูลของอินเวอร์เตอร์สามระดับเป็นดังรูปที่ 2.1 โดยแรงดันทั้ง 3 ระดับเมื่อเทียบกับศักย์ที่จุดอ้างอิง (จุด N)ได้แก่

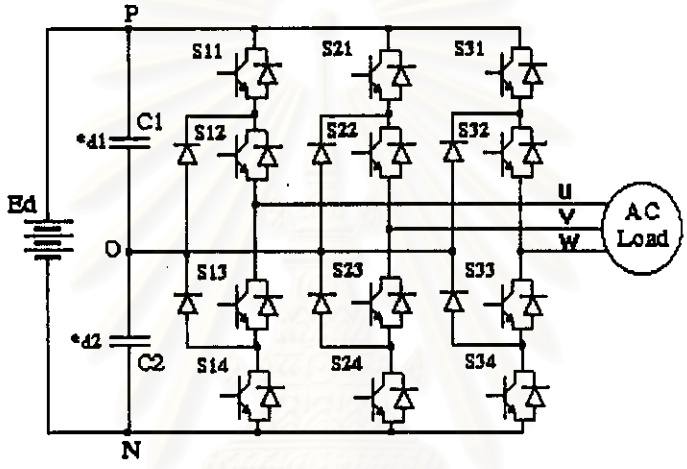
1. แรงดัน P (V_{PN}) อันเป็นแรงดันบัสไฟตรงที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_1 และตัวเก็บประจุ C_2 รวมกัน
2. แรงดัน O (V_{ON}) หรือแรงดันนิวทรัลเป็นแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_2
3. แรงดัน N (V_{NN}) เป็นแรงดันที่จุดอ้างอิง



รูปที่ 2.1 วงจรสมมูลของอินเวอร์เตอร์สามระดับ

จึงเป็นผลให้ในแต่ละเฟสสามารถสร้างแรงดันได้ 3 ค่า โดยจะใช้อุปกรณ์สวิตชิง 4 ตัวต่อเฟส รวมทั้งสามเฟสจะมี 12 ตัว วงจรอินเวอร์เตอร์สามระดับจริงเป็นดังรูปที่ 2.2 และสามารถสรุปสถานะการสวิตช์เพื่อสร้างระดับแรงดันทั้งสามระดับในแต่ละเฟสได้ดังตารางที่ 2.1 กล่าวคือ

- เมื่อต้องการแรงดัน P จะต่อสวิตช์ 2 ตัวบนสุด และตัดสวิตช์ 2 ตัวล่าง
- เมื่อต้องการแรงดัน O จะต่อสวิตช์ 2 ตัวกลาง และตัดสวิตช์ตัวบนสุดกับสวิตช์ล่างสุด
- เมื่อต้องการแรงดัน N จะต่อสวิตช์สองตัวล่างสุด และตัดสวิตช์สองตัวบนสุด



รูปที่ 2.2 วงจรอินเวอร์เตอร์สามระดับ

ตารางที่ 2.1 สถานะการสวิตช์ของแต่ละเฟส

Switch / Output Voltage / State	Sx1	Sx2	Sx3	Sx4
P	ON	ON	OFF	OFF
O	OFF	ON	ON	OFF
N	OFF	OFF	ON	ON

เมื่อ x = 1,2,3

เวกเตอร์แรงดันของอินเวอร์เตอร์สามระดับ

เนื่องจากอินเวอร์เตอร์สามระดับแต่ละเฟสสามารถสวิตช์เพื่อสร้างแรงดันได้ 3 ค่า จึงสร้างเวกเตอร์แรงดันได้ทั้งหมด 27 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 2.3 โดยที่เวกเตอร์แรงดันมีนิยามดังสมการ การแปลงเวกเตอร์แรงดันจากระบบ 3 แกน (เฟส U เฟส V และเฟส W) ไปเป็นระบบ 2 แกน (เฟส X และเฟส Y) และสามารถแปลงกลับกันได้โดยใช้สมการที่ 2.1 และ 2.2 ต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} Ux \\ Uy \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Uu \\ Uv \\ Uw \end{bmatrix} \tag{2.1}$$

$$\begin{bmatrix} Uu \\ Uv \\ Uw \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} \\ \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Ux \\ Uy \end{bmatrix} \tag{2.2}$$

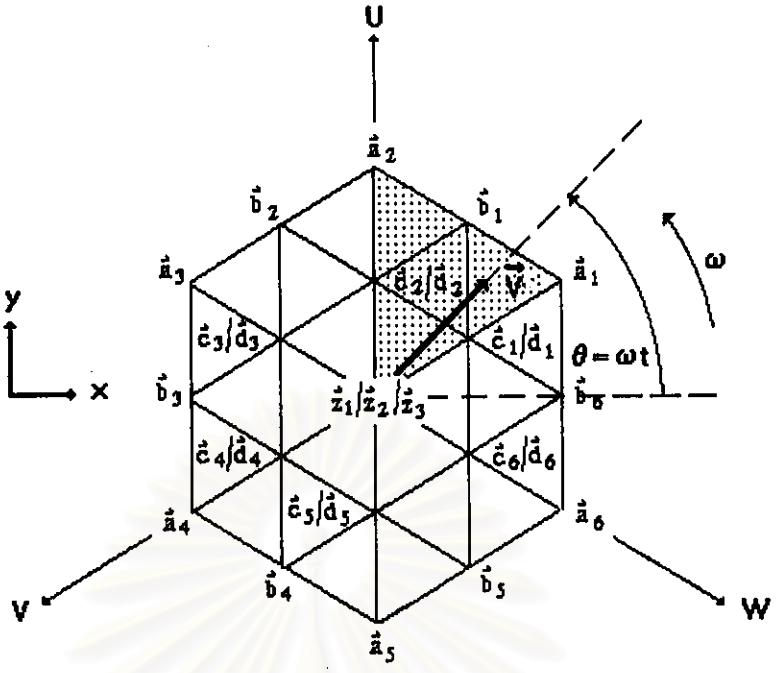
ในที่นี้ Uu Uv และ Uw คือแรงดันเฟส U เฟส V และเฟส W

Ux และ Uy คือองค์ประกอบเวกเตอร์แรงดันในแนวแกนตั้งฉาก X-Y

และเราสามารถแสดงลักษณะการสวิตช์ของเวกเตอร์แต่ละตัวได้ดังตารางที่ 2.2 ซึ่งใช้ตัวอักษร P O หรือ N แทนระดับแรงดันขาออกของแต่ละเฟสจำนวน 3 ค่าเรียงตามลำดับเฟสคือเฟส U เฟส V และเฟส W ตามลำดับ ตัวอย่างเช่น เวกเตอร์ $\bar{b}_3$ (OPN) หมายความว่า เฟส U จะต่อสวิตช์ที่จุดกึ่งกลาง(จุด O) และสร้างแรงดัน O เฟส V จะต่อสวิตช์ที่จุด P และสร้างแรงดัน P และเฟส W จะต่อสวิตช์ที่จุด N และสร้างแรงดัน N ตามลำดับ เป็นต้น

เราสามารถแบ่งเวกเตอร์แรงดันในรูปที่ 2.3 ตามขนาดได้ 5 กลุ่ม (R. Rojas,T. Ohnishi and T. Suzuki1,1995;1994) คือ

1. กลุ่ม a ซึ่งเป็นเวกเตอร์ขนาดใหญ่ ($|a| = \sqrt{2/3} * Ed$)
2. กลุ่ม b ซึ่งเป็นเวกเตอร์ขนาดกลาง ($|b| = \sqrt{2}/2 * Ed$)
3. กลุ่ม c ซึ่งเป็นเวกเตอร์ขนาดเล็ก($|c| = \sqrt{2/3} * Ed/2$)
4. กลุ่ม d ซึ่งเป็นเวกเตอร์ขนาดเล็ก (ลักษณะการสวิตช์ต่างจากกลุ่ม c แต่จะให้เวกเตอร์แรงดันที่เหมือนกัน $|d| = \sqrt{2/3} * Ed/2$)
5. กลุ่ม z ซึ่งเป็นเวกเตอร์ศูนย์



รูปที่ 2.3 เวกเตอร์แรงดันของอินเวอร์เตอร์สามระดับ

ตารางที่ 2.2 ลักษณะการสวิตช์ของเวกเตอร์ในแต่ละกลุ่ม

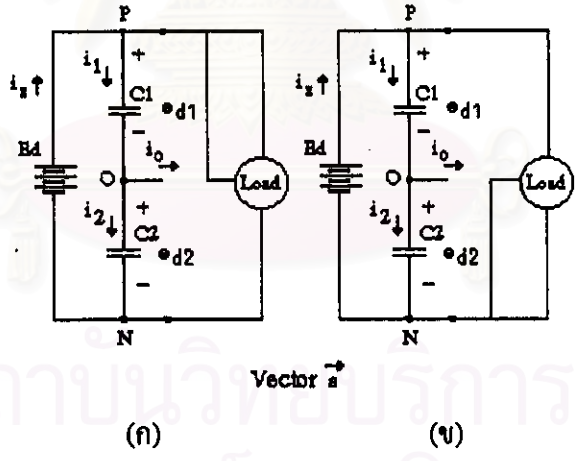
Group	Vector			
	n	Output State	n	Output State
a	1	PNP	4	NPN
	2	PNN	5	NPP
	3	PPN	6	NNP
b	1	PNO	4	NPO
	2	PON	5	NOP
	3	OPN	6	ONP
c	1	POP	4	OPO
	2	POO	5	OPP
	3	PPO	6	OOP
d	1	ONO	4	NON
	2	ONN	5	NOO
	3	OON	6	NNO
z	Z_1(PPP) Z_2(OOO) Z_3(NNN)			

ในการเลือกใช้เวกเตอร์แต่ละกลุ่มนั้น จำเป็นต้องพิจารณาถึงเรื่องการเชื่อมต่อกับโหลดด้วย เพราะอินเวอร์เตอร์สามระดับนั้น แรงดันไฟตรงกึ่งกลางหรือแรงดันนิวทรัลจะได้จากการนำตัวเก็บประจุ 2 ตัวมาต่ออนุกรมกัน ดังนั้น ในการสร้างสัญญาณการสวิตช์ เราต้องคำนึงถึงการควบคุมระดับแรงดันนิวทรัล(แรงดัน O)ด้วย เพื่อให้แรงดันขาออกไม่เกิดการเพี้ยนไปจากรูปคลื่นที่ต้องการ และผลของการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันนิวทรัลไม่ส่งผลต่อขีดจำกัดของตัวเก็บประจุและอุปกรณ์สวิตชิง

<u>การเชื่อมต่อโหลด</u>

ด้วยเหตุผลที่กล่าวมา เราจะพิจารณาการเชื่อมต่อโหลดสำหรับรูปแบบการสวิตช์ของเวกเตอร์แต่ละกลุ่ม ดังต่อไปนี้

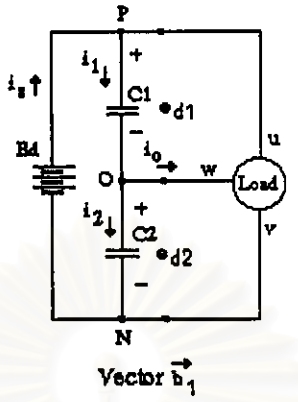
1. <u>เวกเตอร์กลุ่ม a</u> ได้แก่ เวกเตอร์ $\vec{a}_1$(PNP) $\vec{a}_2$(PNN) $\vec{a}_3$(PPN) $\vec{a}_4$(NPN) $\vec{a}_5$(NPP) และ $\vec{a}_6$(NNP) จะเห็นว่า มีลักษณะการเชื่อมต่อโหลดอยู่ 2 ลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.4 และไม่มีการใช้ระดับแรงดัน O จึงไม่มีปัญหาเรื่องการรักษาระดับแรงดันนิวทรัล เพราะไม่มีกระแสไหลออก/เข้า ที่จุด O



รูปที่ 2.4 การเชื่อมต่อโหลดของเวกเตอร์กลุ่ม a

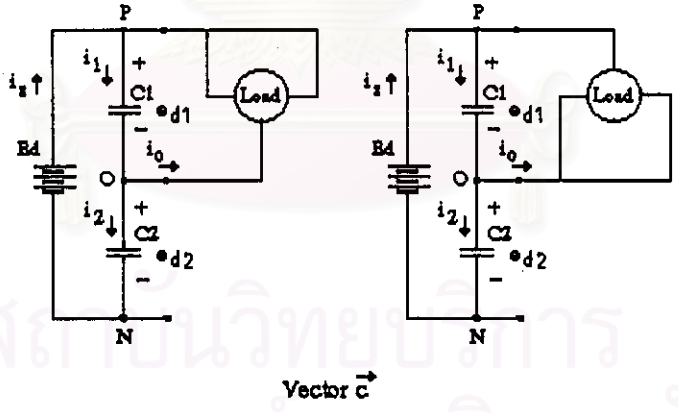
2. <u>เวกเตอร์กลุ่ม b</u> ได้แก่ เวกเตอร์ $\vec{b}_1$(PNO) $\vec{b}_2$(PON) $\vec{b}_3$(OPN) $\vec{b}_4$(NPO) $\vec{b}_5$(NOP) และ $\vec{b}_6$(ONP) จะเห็นว่า มีลักษณะการเชื่อมต่อโหลด ซึ่งมีการใช้ระดับแรงดันครบทั้งสามระดับ ดังตัวอย่างของเวกเตอร์ $\vec{b}_1$ ที่แสดงในรูปที่ 2.5 ซึ่งเฟส W จะเชื่อมต่อที่ระดับแรงดัน O ดังนั้น เมื่ออินเวอร์เตอร์ทำงานโดยใช้เวกเตอร์ $\vec{b}_1$ จะทำให้แรงดันนิวทรัลเกิดการเปลี่ยนแปลงตามกระแสนิวทรัลที่เกิดขึ้น จึงจำเป็นต้องมีการควบคุมระดับแรงดันนิวทรัลนี้ ในทำนองเดียวกัน

เราสามารถพิจารณาเวกเตอร์กลุ่ม b ตัวอื่นได้ โดยเราจะพบว่าเฟสที่เชื่อมต่อกับระดับแรงดัน O จะเปลี่ยนไปเท่ากัน



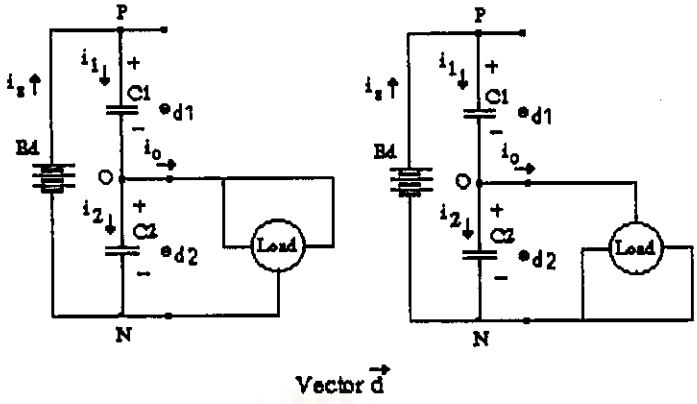
รูปที่ 2.5 การเชื่อมต่อโหลดของเวกเตอร์ $\vec{b}_1$

3. <u>เวกเตอร์กลุ่ม c</u> ได้แก่ เวกเตอร์ $\vec{c}_1$(POP) $\vec{c}_2$(POO) $\vec{c}_3$(PPO) $\vec{c}_4$(OPO) $\vec{c}_5$(OPP) และ $\vec{c}_6$(OOP) จะเห็นว่า มีลักษณะการเชื่อมต่อโหลดอยู่ 2 ลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.6 โดยโหลดจะต่อขนานกับตัวเก็บประจุ C_1 และมีการใช้ระดับแรงดัน O จึงมีปัญหาเรื่องการรักษาระดับแรงดันนิวทรัลเช่นกัน



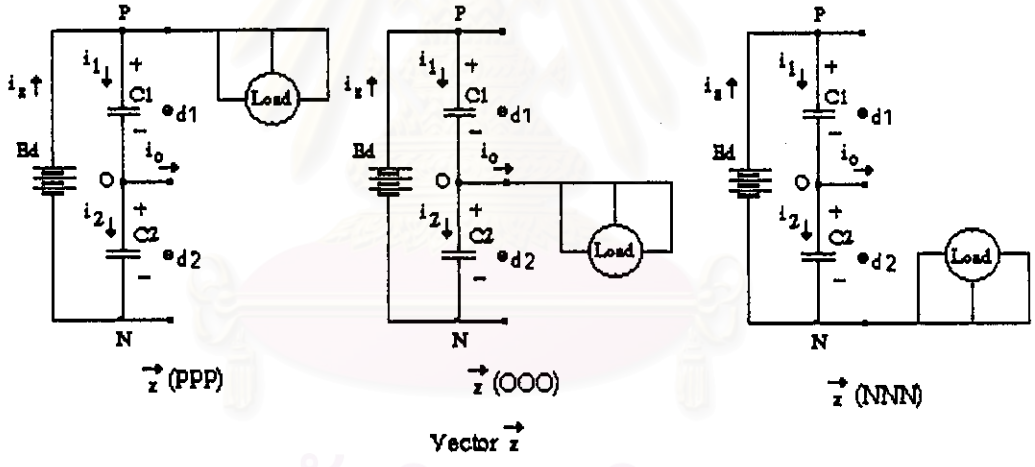
รูปที่ 2.6 การเชื่อมต่อโหลดของเวกเตอร์กลุ่ม c

4. <u>เวกเตอร์กลุ่ม d</u> ได้แก่ เวกเตอร์ $\vec{d}_1$(ONO) $\vec{d}_2$(ONN) $\vec{d}_3$(OON) $\vec{d}_4$(NON) $\vec{d}_5$(NOO) และ $\vec{d}_6$(NNO) จะเห็นว่า มีลักษณะการเชื่อมต่อโหลดอยู่ 2 ลักษณะคล้ายกับกรณีของเวกเตอร์กลุ่ม C ดังแสดงในรูปที่ 2.7 เพียงแต่ว่าในกรณีนี้ โหลดจะต่อขนานกับตัวเก็บประจุ C_2 แทนและมีการใช้ระดับแรงดัน O เช่นกัน ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันนิวทรัลจะเป็นไปในทางผลตรงกันข้ามกับกรณีของเวกเตอร์กลุ่ม C



รูปที่ 2.7 การเชื่อมต่อโหลดของเวกเตอร์กลุ่ม d

5. <u>เวกเตอร์กลุ่ม z</u> ได้แก่ เวกเตอร์ $\vec{z}_1(PPP)$ $\vec{z}_2(OOO)$ และ $\vec{z}_3(NNN)$ จะเห็นได้ว่าเวกเตอร์เหล่านี้มีลักษณะการเชื่อมต่อโหลด โดยทั้งสามเฟสจะเชื่อมต่อกันที่ระดับแรงดันเดียวกันหมด ดังรูปที่ 2.8 การใช้เวกเตอร์กลุ่มนี้จึงไม่มีปัญหาเรื่องการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันนิวทรัล



รูปที่ 2.8 การเชื่อมต่อโหลดของเวกเตอร์กลุ่ม z

จากที่กล่าวมาทั้งหมด เราสามารถสรุปได้ว่า การเปลี่ยนแปลงของระดับแรงดันนิวทรัลเกิดขึ้นเมื่อมีการเลือกใช้เวกเตอร์กลุ่ม b เวกเตอร์กลุ่ม c และเวกเตอร์กลุ่ม d ตัวอย่างเช่น เมื่อเลือกใช้เวกเตอร์ $\vec{b}_1$ หรือเวกเตอร์ $\vec{c}_1$ หรือเวกเตอร์ $\vec{d}_1$ จะมีการเชื่อมต่อตัวเก็บประจุระหว่างแรงดันบัสไฟตรงกับโหลดดังแสดงในรูปที่ 2.9 เราจึงจำเป็นที่จะต้องศึกษารายละเอียดการเปลี่ยนแปลงของระดับแรงดันนิวทรัลว่าขึ้นกับปัจจัยใดบ้าง

จากวงจรในรูปที่ 2.9 เมื่อกำหนดให้ $C_1 = C_2 = C$ และแรงดันบัสไฟตรง(Ed)มีค่าคงที่ จะได้สมการความสัมพันธ์ ดังต่อไปนี้

$$\frac{de_{d1}}{dt} = \frac{i_1}{C} \tag{2.3}$$

$$\frac{de_{d2}}{dt} = \frac{i_2}{C} \tag{2.4}$$

$$\frac{de_{d1}}{dt} + \frac{de_{d2}}{dt} = \frac{dE_d}{dt} = 0 \tag{2.5}$$

โดยที่ e_{d1} และ e_{d2} คือแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ C1 และ C2 ตามลำดับ

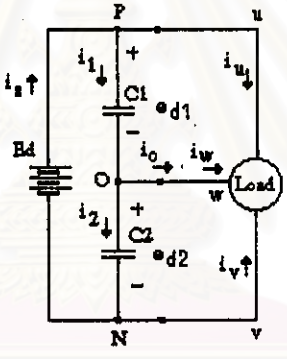
i_1 และ i_2 คือกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ C1 และ C2 ตามลำดับ

i_0 คือกระแสนิวทรัลที่ไหลออกจากจุดนิวทรัล (จุด O)

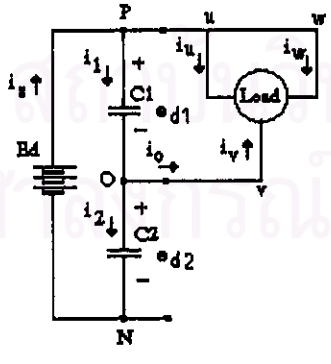
$$i_1 = i_0 + i_2 \tag{2.6}$$

ดังนั้น

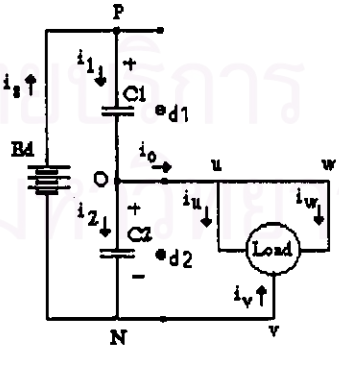
$$i_1 = -i_2 = i_0/2 \tag{2.7}$$



Vector $\vec{b}_1$



Vector $\vec{c}_1$



Vector $\vec{d}_1$

รูปที่ 2.9 การเชื่อมต่อตัวเก็บประจุกับโหลดในกรณีที่ใช้เวกเตอร์ $\vec{b}_1$ $\vec{c}_1$ และ $\vec{d}_1$

จะเห็นได้ว่า กระแสนิวทรัล (i_0) จะเป็นตัวกำหนดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ จึงมีผลต่อการรักษาระดับแรงดันนิวทรัล และเนื่องจากขนาดของกระแสนิวทรัลขึ้นอยู่กับลักษณะการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ ดังนั้น เวกเตอร์แรงดันแต่ละตัวจะให้กระแสนิวทรัลที่มีขนาดแตกต่างกัน ในกรณีตัวอย่างในรูปที่ 2.9 นี้ จะได้ว่า

เวกเตอร์ $\bar{b}_1$ จะมี $i_0 = i_w$

เวกเตอร์ $\bar{c}_1$ จะมี $i_0 = i_v$

เวกเตอร์ $\bar{d}_1$ จะมี $i_0 = -i_v$

และเมื่อพิจารณาเวกเตอร์แรงดันกลุ่ม b กลุ่ม c และกลุ่ม d ทุกตัวสามารถสรุปผลของกระแสนิวทรัลได้ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 กระแสนิวทรัล(i_0) อันเป็นผลจากการเลือกใช้เวกเตอร์กลุ่ม b กลุ่ม c และกลุ่ม d

Group	Vector					
	n	Output State	i_0	n	Output State	i_0
b	1	PNO	i_w	4	NPO	i_w
	2	PON	i_v	5	NOP	i_v
	3	OPN	i_u	6	ONP	i_u
c	1	POP	i_v	4	OPO	$-i_v$
	2	POO	$-i_u$	5	OPP	i_u
	3	PPO	i_w	6	OOP	$-i_w$
d	1	ONO	$-i_v$	4	NON	i_v
	2	ONN	i_u	5	NOO	$-i_u$
	3	OON	$-i_w$	6	NNO	i_w

จะเห็นว่า ในการเลือกใช้เวกเตอร์เพื่อการปรับความกว้างพัลส์ของอินเวอร์เตอร์สามระดับให้ได้รูปคลื่นแรงดันตามต้องการโดยไม่มีความเพี้ยนนั้น เราจะต้องควบคุมระดับแรงดันนิวทรัลไม่ให้คลาดเคลื่อนจากค่าครึ่งหนึ่งของแรงดันบัสไฟตรง ซึ่งเราพบว่า ปัญหาการควบคุมระดับแรงดันจะเกิดขึ้น เมื่อมีการเลือกใช้เวกเตอร์กลุ่ม b กลุ่ม c และ กลุ่ม d โดยเวกเตอร์กลุ่ม c และกลุ่ม d จะให้

ผลการเปลี่ยนแปลงของระดับแรงดันนิวทรัลในทางตรงข้ามกัน และกระแสนิวทรัล (i_0) จะเป็นตัวกำหนดการเปลี่ยนแปลงของระดับแรงดันนิวทรัล

อย่างไรก็ตาม จากตารางที่ 2.3 เมื่อเราพิจารณาในรายละเอียดจะพบว่า สำหรับคู่เวกเตอร์ในกลุ่ม b ที่มีทิศตรงข้ามกันคือ $\bar{b}_1$- $\bar{b}_4$ $\bar{b}_2$-$\bar{b}_5$ และ $\bar{b}_3$- $\bar{b}_6$ จะมีกระแสนิวทรัลเป็นค่ากระแสในเฟสเดียวกันคือi_w i_v และi_u ตามลำดับ ดังนั้น เมื่อมีการใช้คู่เวกเตอร์เหล่านี้ เช่น $\bar{b}_1$- $\bar{b}_4$ ผลการเปลี่ยนแปลงของแรงดันนิวทรัลสามารถพิจารณาได้จาก กระแส i_w ณ เวลาที่ใช้คู่เวกเตอร์นี้ แต่เนื่องจากว่า ตำแหน่งของเวกเตอร์ $\bar{b}_1$ และ $\bar{b}_4$ อยู่เลื่อนเฟสกัน 180 องศา (มีทิศตรงข้ามกัน) ดังนั้น มุมของกระแสเฟส W (i_w) ณ เวลาที่เราใช้เวกเตอร์ $\bar{b}_1$ ($i_w(t1)$) ย่อมจะมีการเลื่อนเฟสเป็นมุม 180 องศา เมื่อเทียบกับกระแส i_w ณ เวลาที่ใช้เวกเตอร์ $\bar{b}_4$ ($i_w(t4)$) ผลรวมของการเปลี่ยนแปลงของแรงดันนิวทรัลที่เกิดจากการใช้เวกเตอร์ $\bar{b}_1$ และ $\bar{b}_4$ ย่อมเป็นศูนย์ เพราะ $i_w(t1) = -i_w(t4)$ กล่าวคือ แรงดันนิวทรัลอาจมีการกระเพื่อมขึ้นลงได้ แต่ค่าผลรวมของการเปลี่ยนแปลงแรงดันนิวทรัลจะเป็นศูนย์ ในทำนองเดียวกัน คู่เวกเตอร์ $\bar{b}_2$ -$\bar{b}_5$ และ $\bar{b}_3$- $\bar{b}_6$ ก็จะทำให้เกิดผลเช่นเดียวกัน เราจึงสามารถสรุปได้ว่า การใช้เวกเตอร์กลุ่ม b ไม่มีผลทำให้แรงดันนิวทรัลเปลี่ยนแปลง ในทางตรงกันข้าม คู่เวกเตอร์กลุ่ม c และกลุ่ม d ที่มีทิศตรงกันข้าม เช่น คู่ เวกเตอร์ $\bar{c}_1$ - $\bar{c}_4$ จะมีค่ากระแสนิวทรัลที่มีเครื่องหมายต่างกันเป็น i_v และ $-i_v$ ตามลำดับ แต่เนื่องจากกระแสในเฟส V (i_v) ณ เวลาที่ใช้เวกเตอร์ $\bar{c}_4$ ($i_v(t1)$) จะมีการเลื่อนเฟสเป็นมุม 180 องศา เมื่อเทียบกับกระแส i_v ณ เวลาที่ใช้เวกเตอร์ $\bar{c}_4$ ($i_v(t4)$) ดังนั้น กระแสนิวทรัล(i_0) ณ เวลา t1 จะมีค่าเท่ากันกับกระแสนิวทรัล(i_0) ณ เวลา t4 กล่าวคือ $i_0(t1)=i_v(t1)=i_0(t4)=-i_v(t4)$ ดังนั้น การใช้คู่เวกเตอร์ $\bar{c}_1$ - $\bar{c}_4$ จะส่งผลให้แรงดันนิวทรัลเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกัน ไม่ใช่ตรงกันข้ามกันเหมือนในกรณีเวกเตอร์กลุ่ม b สำหรับคู่เวกเตอร์อื่น ๆ ในกลุ่ม c และกลุ่ม d เราก็สามารถสรุปได้ในทำนองเดียวกัน

จากที่กล่าวมาทั้งหมด เราสรุปได้ว่า ในการเลือกใช้เวกเตอร์ของอินเวอร์เตอร์สามระดับนั้น เวกเตอร์กลุ่ม a และกลุ่ม z จะไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดันนิวทรัล เวกเตอร์กลุ่ม b อาจทำให้แรงดันนิวทรัลกระเพื่อม แต่ผลรวมของการเปลี่ยนแปลงของแรงดันนิวทรัลจะไม่เปลี่ยนแปลง จะมีเพียงแต่เวกเตอร์กลุ่ม c และกลุ่ม d ที่ทำให้แรงดันนิวทรัลเปลี่ยนแปลง ดังนั้น เราจำเป็นที่จะต้องมีการเลือกใช้กลุ่มเวกเตอร์นี้อย่างเหมาะสม เพื่อรักษาระดับแรงดันนิวทรัลให้มีค่าคงที่ที่กึ่งกลางของแรงดันบัสไฟตรงด้วย ดังจะได้กล่าวในบทต่อไป