

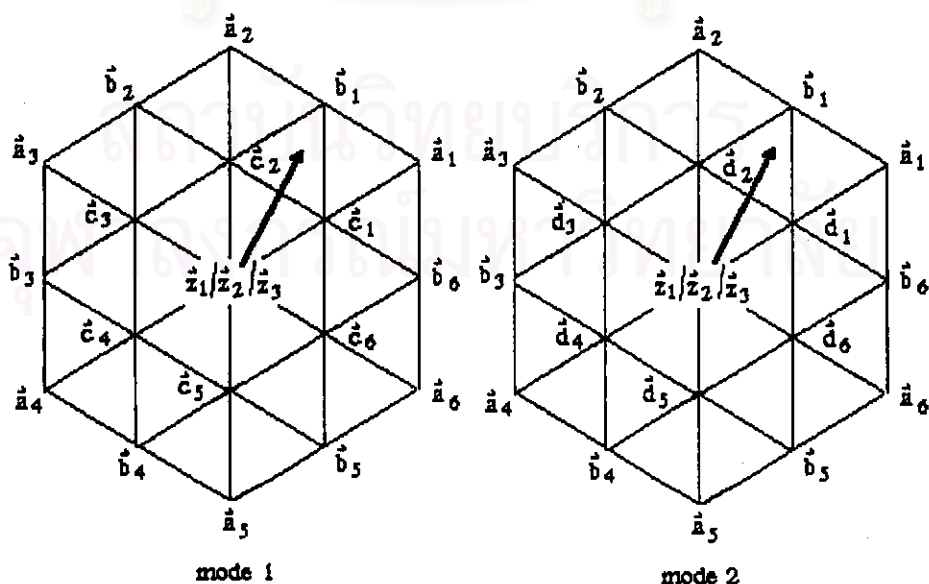
### บทที่ 3

#### วิธีการปรับความกว้างพัลส์อย่างง่ายสำหรับอินเวอร์เตอร์สามระดับ

ในงานวิจัยนี้ เราได้นำเสนอวิธีการปรับความกว้างพัลส์อย่างง่าย ซึ่งสามารถควบคุมแรงดันนิวทรัลได้โดยง่ายด้วย วิธีนี้จะอาศัยการเลือกใช้เวกเตอร์กลุ่ม c และกลุ่ม d ซึ่งให้ผลการเปลี่ยนแปลงของแรงดันนิวทรัลในทางตรงข้ามกัน มาควบคุมแรงดันนิวทรัลให้อยู่ในขอบเขตที่กำหนด บทนี้จะกล่าวถึงหลักการทํางาน การสร้างสัญญาณการสวิตช์ การตรวจสอบตำแหน่งของเวกเตอร์อ้างอิง การคำนวณหาคาบเวลาของการสวิตช์ กระแสนิวทรัล และการเปลี่ยนแปลงของแรงดันนิวทรัล และการทดสอบวิธีการที่พัฒนาขึ้น โดยการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/simulink

#### หลักการทํางาน

วิธีการปรับความกว้างพัลส์ที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้อาศัยแนวความคิดจากบทที่ผ่านมาที่ว่า เวกเตอร์กลุ่ม c และกลุ่ม d จะสร้างเวกเตอร์แรงดันที่เหมือนกัน แต่ให้ผลการเปลี่ยนแปลงของแรงดันนิวทรัลในทางตรงข้ามกันมาใช้เป็นหลักในการทํางาน โดยแบ่งโหมดการทํางานออกเป็น 2 โหมด คือ



รูปที่ 3.1 เวกเตอร์แรงดันที่ใช้ในโหมดการทํางานในโหมด 1 และ 2

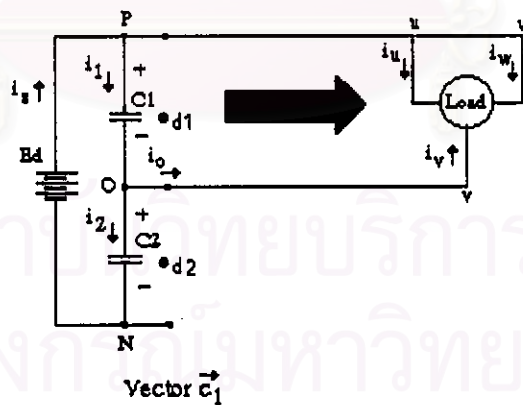
1. โหมค 1 เลือกใช้เฉพาะเวกเตอร์กลุ่ม c ไม่ใช้เวกเตอร์กลุ่ม d
2. โหมค 2 เลือกใช้เฉพาะเวกเตอร์กลุ่ม d ไม่ใช้เวกเตอร์กลุ่ม c

เพื่อความคุมแรงดันนิวทรัลให้อยู่ในขอบเขตที่กำหนดให้เป็นแถบฮิสเตอร์ซิส ซึ่งเราสามารถแสดงเวกเตอร์แรงดันของโหมคการทำงานทั้ง 2 ได้ดังรูปที่ 3.1 และมีเกณฑ์ในการเลือกโหมคการทำงานขึ้นกับเครื่องหมายของกระแสแหล่งจ่ายไฟตรง ดังต่อไปนี้

### 1. กรณีแหล่งจ่ายไฟตรงจ่ายพลังงานแก่โหลด ( $i_s > 0$ )

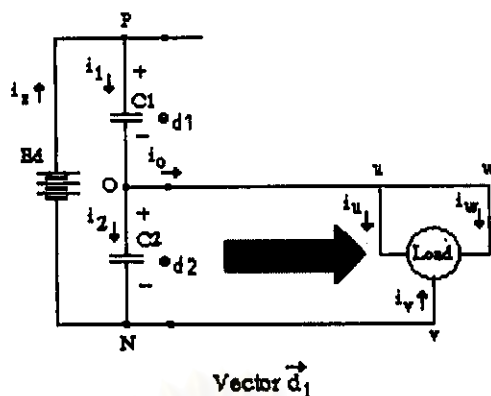
เมื่อเลือกใช้เวกเตอร์กลุ่ม c นั้น เราจะได้วงจรมูลแสดงการทำงานดังรูปที่ 3.2 (ก) โดยโหมคนั้นมีลักษณะต่อขนานกับตัวเก็บประจุ  $C_1$  และจะรับพลังงานจากบัสไฟตรง ดังนั้นตัวเก็บประจุ  $C_1$  จะคายประจุ เป็นผลให้แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ  $C_1$  ( $e_{d1}$ ) ลดลง และแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ  $C_2$  ( $e_{d2}$ ) เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจาก ผลรวมของแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ  $C_1$  และตัวเก็บประจุ  $C_2$  จะเท่ากับแรงดันบัสไฟตรงซึ่งมีค่าคงที่ตลอดเวลา

ในทำนองกลับกัน เมื่อเลือกใช้เวกเตอร์กลุ่ม d นั้น เราจะได้วงจรมูลแสดงการทำงานดังรูปที่ 3.2 (ข) โดยโหมคนั้นมีลักษณะต่อขนานกับตัวเก็บประจุ  $C_2$  แทน และจะรับพลังงานจากบัสไฟตรง ดังนั้น ในกรณีนี้ ตัวเก็บประจุ  $C_2$  จะคายประจุเป็นผลให้แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ  $C_2$  ( $e_{d2}$ ) ลดลง และแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ  $C_1$  ( $e_{d1}$ ) เพิ่มขึ้น



(ก) กรณีเวกเตอร์กลุ่ม c

รูปที่ 3.2 วงจรมูลเมื่อแหล่งจ่ายไฟตรงจ่ายพลังงานแก่โหลด



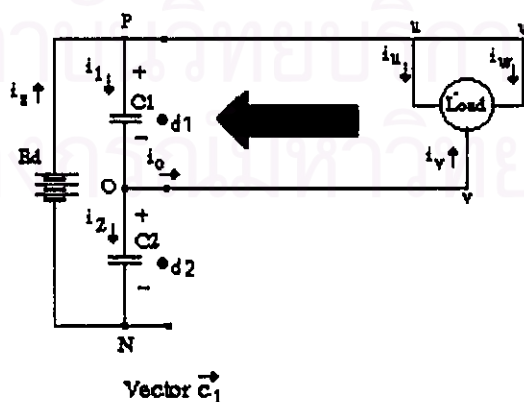
(ข) กรณีเวกเตอร์กลุ่ม d

รูปที่ 3.2 วงจรสมมูลเมื่อแหล่งจ่ายไฟตรงจ่ายพลังงานแก่โหลด(ต่อ)

2. กรณีแหล่งจ่ายไฟตรงรับพลังงานจากโหลด ( $i_s < 0$ )

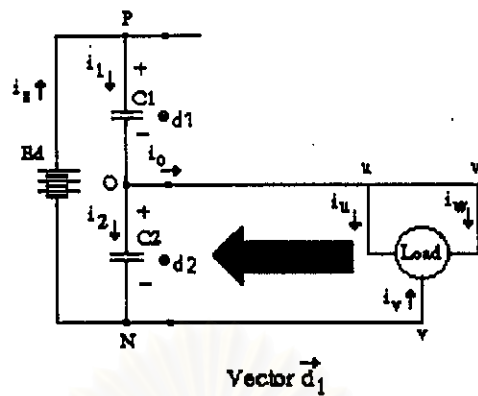
ในกรณีนี้เมื่อเลือกใช้เวกเตอร์กลุ่ม c นั้น เราจะได้วงจรสมมูลแสดงการทำงานดังรูปที่ 3.3 (ก) โดยโหลดนั้นจะจ่ายพลังงานคืนให้กับแหล่งจ่ายไฟตรง และทำให้ตัวเก็บประจุ  $C_1$  เก็บประจุเพิ่มขึ้น เป็นผลให้แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ  $C_1$  ( $e_{d1}$ ) เพิ่มขึ้น และแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ  $C_2$  ( $e_{d2}$ ) ลดลง

ในทำนองกลับกัน เมื่อเลือกใช้เวกเตอร์กลุ่ม d นั้น เราจะได้วงจรสมมูลแสดงการทำงานดังรูปที่ 3.3 (ข) โดยโหลดนั้นจะจ่ายพลังงานคืนแหล่งจ่ายไฟตรงเหมือนเดิม และตัวเก็บประจุ  $C_2$  ก็จะเก็บประจุเพิ่มขึ้นแทน เป็นผลให้แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ  $C_2$  ( $e_{d2}$ ) เพิ่มขึ้น และแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ  $C_1$  ( $e_{d1}$ ) ลดลง



(ก) กรณีเวกเตอร์กลุ่ม c

รูปที่ 3.3 วงจรสมมูลเมื่อแหล่งจ่ายไฟตรงรับพลังงานจากโหลด



(ข) กรณีเวกเตอร์กลุ่ม d

รูปที่ 3.3 วงจรสมมูลเมื่อแหล่งจ่ายไฟตรงรับพลังงานจากโหลด(ต่อ)

จากที่กล่าวมาทั้งหมด เราสรุปลักษณะการเปลี่ยนแปลงของแรงดันนิวทรีล ( $V_o$ ) ซึ่งขึ้นอยู่กับโหมดการทำงานได้ดังตารางที่ 3.1 และในโครงการวิจัยนี้ เราจะเลือกใช้วิธีการควบคุมแรงดันนิวทรีลแบบฮิสเตอร์ซิสต์ โดยกำหนดขอบเขตของแถบฮิสเตอร์ซิสต์เป็น  $\pm E$  รอบค่าครึ่งหนึ่งของแรงดันบัสไฟตรง ดังแสดงในตารางที่ 3.2 และเราสามารถสรุปหลักเกณฑ์ในการเลือกโหมดการทำงานได้ดังตารางที่ 3.2 กล่าวคือ ในกรณีแหล่งจ่ายไฟตรงจ่ายพลังงานให้แก่โหลดเมื่อแรงดันนิวทรีล ( $V_o$ ) มากกว่าครึ่งหนึ่งของแรงดันบัสไฟตรงเกินกว่าขอบเขตที่ต้องการควบคุม ( $E$ ) เราเลือกใช้โหมดการทำงานที่ 2 และเมื่อแรงดันนิวทรีล ( $V_o$ ) น้อยกว่าครึ่งหนึ่งของแรงดันบัสไฟตรงเกินกว่าขอบเขตที่ต้องการควบคุม ( $E$ ) จะเลือกใช้โหมดการทำงานที่ 1 ในทำนองกลับกัน เราสามารถพิจารณาการเลือกใช้โหมดการทำงานกรณีแหล่งจ่ายไฟตรงรับพลังงานจากโหลดได้ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 การเพิ่มลดของแรงดันนิวทรีล( $V_o$ ) กับ โหมดการทำงาน

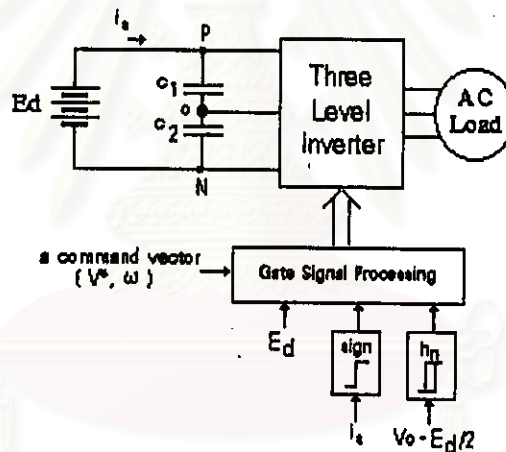
	$i_s > 0$	$i_s < 0$
mode 1	$V_o$ เพิ่ม	$V_o$ ลด
mode 2	$V_o$ ลด	$V_o$ เพิ่ม

ตารางที่ 3.2 เกณฑ์ในการเลือกโหมดการทำงาน

	$i_s > 0$	$i_s < 0$
$V_o - E_d/2 > \epsilon$	mode 2	mode 1
$E_d/2 - V_o > \epsilon$	mode 1	mode 2

(เมื่อ  $\epsilon$  คือขอบเขตของระดับแรงดันนิวทรัลที่ต้องการควบคุม)

และบล็อกไดอะแกรมแสดงวงจรการทำงาน แสดงได้ดังในรูปที่ 3.4 ซึ่งจะเห็นว่า ระบบนั้นไม่ซับซ้อนยุ่งยาก และต้องการเพียงฮาร์ดแวร์ที่ใช้ตรวจจับเครื่องหมายของแรงดันนิวทรัล และกระแสแหล่งจ่ายไฟตรงเพื่อนำมาเลือกโหมดการทำงานเท่านั้น ส่วนการตรวจจับขนาดแรงดันไฟตรงนั้นทุกระบบจำเป็นต้องมี เพื่อใช้ในการคำนวณและสร้างสัญญาณการสวิทช์ให้สอดคล้องกับขนาดของแรงดันบัสไฟตรงจริง



รูปที่ 3.4 บล็อกไดอะแกรมแสดงวงจรการทำงาน

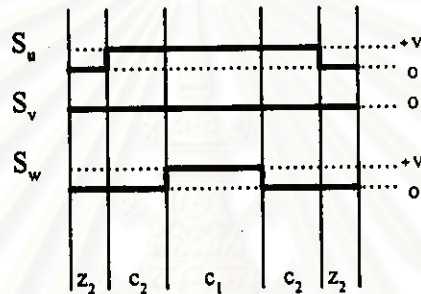
การเลือกเวกเตอร์และการสร้างสัญญาณการสวิทช์

ในการปรับความกว้างพัลส์อย่างง่ายวิธีนี้นั้น เราเลือกใช้เวกเตอร์แรงดัน 3 ตัวที่อยู่ใกล้เคียงกับเวกเตอร์อ้างอิงมากที่สุด ทั้งนี้เพื่อให้ระลอกแรงดันที่เกิดความแตกต่างจากค่าแรงดันอ้างอิงมีค่าน้อยที่สุด เมื่อพิจารณาจากเวกเตอร์แรงดันของอินเวอร์เตอร์สามระดับ เวกเตอร์ดังกล่าวจะอยู่ที่มุมของสามเหลี่ยมย่อยที่มีเวกเตอร์อ้างอิงอยู่ การสร้างแรงดันออกจะอาศัยการแบ่งช่วงเวลาการใช้เวกเตอร์แรงดัน 3 ตัวที่เลือกมาแล้วให้ได้ค่าเฉลี่ยแรงดันต่อคาบเวลาการสวิทช์ มีค่าเท่ากับ เวกเตอร์อ้างอิง ซึ่งก็คือ หลักการการปรับความกว้างพัลส์ด้วยวิธีสเปซเวกเตอร์ทั่วไปนั่นเองเราจะเลือกใช้การปรับความกว้างพัลส์แบบขอบคู่ (double edge) ซึ่งมีลักษณะสมมาตร และมีคุณสมบัติด้าน

การกระจายอาร์มอนิกที่ดี ในที่นี้ เราจะแบ่งการสร้างสัญญาณการสวิตซ์ตามขนาดของเวกเตอร์อ้างอิงออกเป็น 2 กรณี ดังต่อไปนี้คือ

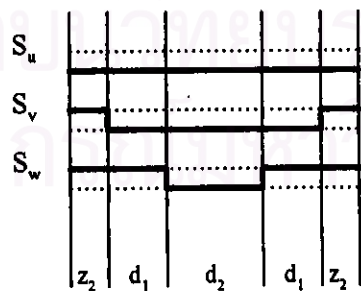
1. เมื่อเวกเตอร์อ้างอิงมีขนาดเล็ก อยู่ภายในหกเหลี่ยมในของรูปเวกเตอร์แรงดันของอินเวอร์เตอร์ตามระดับซึ่งประกอบด้วยจุดยอดของเวกเตอร์แรงดัน  $v_1-v_6 / \bar{v}_1-\bar{v}_6$  เราจะเลือกใช้เวกเตอร์เหล่านี้ในการสร้างแรงดัน โดยหกเหลี่ยมในจะประกอบด้วยสามเหลี่ยมย่อยจำนวน 6 รูป แต่การสร้างแรงดันในแต่ละสามเหลี่ยมย่อยจะพิจารณาแยกออกตามโหมด ดังนี้

ก) ในโหมด 1 จะประกอบด้วยเวกเตอร์กลุ่ม  $c$  และกลุ่ม  $z$  ยกตัวอย่างกรณีเวกเตอร์อ้างอิงนั้นอยู่ในสามเหลี่ยมย่อยซึ่งประกอบด้วยเวกเตอร์กลุ่ม  $z$  เวกเตอร์  $v_1$  (POP) และ  $v_2$  (POO) ที่แสดงในรูปที่ 3.1 สามารถสร้างสัญญาณการสวิตซ์ได้ดังรูป 3.5



รูปที่ 3.5 สัญญาณการสวิตซ์ที่ได้จากเวกเตอร์กลุ่ม  $z$  เวกเตอร์  $v_1$  (POP) และ  $v_2$  (POO)

ข) ในโหมด 2 จะประกอบด้วยเวกเตอร์กลุ่ม  $d$  และกลุ่ม  $z$  ยกตัวอย่างกรณีเวกเตอร์อ้างอิงนั้นอยู่ในสามเหลี่ยมย่อยซึ่งประกอบด้วยเวกเตอร์กลุ่ม  $z$  เวกเตอร์  $\bar{v}_1$  (ONO) และ  $\bar{v}_2$  (ONN) ในรูปที่ 3.1 สามารถสร้างสัญญาณการสวิตซ์ได้ดังรูป 3.6



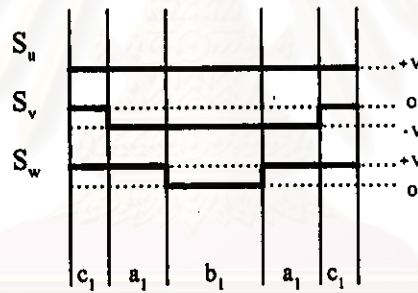
รูปที่ 3.6 สัญญาณการสวิตซ์ที่ได้จากเวกเตอร์กลุ่ม  $z$  เวกเตอร์  $\bar{v}_1$  (ONO) และ  $\bar{v}_2$  (ONN)

2. เมื่อเวกเตอร์อ้างอิงมีขนาดใหญ่ อยู่รอบนอกของหกเหลี่ยมในของรูปเวกเตอร์แรงดันของอินเวอร์เตอร์ตามระดับ บริเวณรอบนอกนี้จะประกอบด้วยสามเหลี่ยมย่อยจำนวน 18 รูป แต่ละ

สามเหลี่ยมย่อยนอกจากเวกเตอร์กลุ่ม a กลุ่ม c และกลุ่ม d แล้ว จะมีเวกเตอร์กลุ่ม b ด้วย ซึ่งในการสร้างสัญญาณการสวิตช์นั้น เวกเตอร์กลุ่ม b นั้น ไม่ส่งผลกระทบต่อการควบคุมแรงดันนิวทรัลด้วยวิธีการปรับความกว้างพัลส์นี้ เนื่องจากเมื่อเวกเตอร์อ้างอิงหมุนวนเข้ามาพิภาคครบ 1 คาบการทำงาน(ผ่านเวกเตอร์  $b_1, b_2, b_3, b_4, b_5$  และ  $b_6$  ตามลำดับ) กระแสที่มีผลกับแรงดันนิวทรัลคือกระแส  $i_w, i_v, i_u, i_w, i_v$  และ  $i_u$  ตามลำดับ และเป็นเพราะเวกเตอร์  $b_1$  กับ  $b_4, b_2$  กับ  $b_5$  และ  $b_3$  กับ  $b_6$  มีเฟสต่างกันเท่ากับ 180 องศา ทำให้กระแสนิวทรัลมีขนาดเท่ากันและเฟสต่างกันเท่ากับ 180 องศาด้วย จึงเป็นผลให้ระดับการเปลี่ยนแปลงแรงดันนิวทรัลโดยเฉลี่ยในหนึ่งคาบการทำงานเท่ากับ 0 เราจะพิจารณาแยกออกตามโหมด ดังนี้

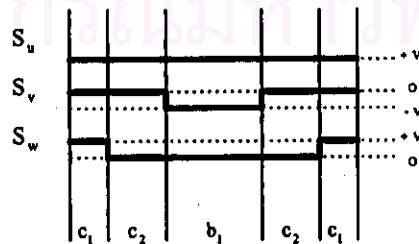
ก) ในโหมด 1 เวกเตอร์แรงดันที่เราใช้จะประกอบด้วยเวกเตอร์กลุ่ม a กลุ่ม b และกลุ่ม c ในที่นี้จะยกตัวอย่าง 3 กรณี เนื่องจากมีโอกาสที่เวกเตอร์อ้างอิงอยู่ในสามเหลี่ยมย่อยได้ 3 แบบซึ่งมีการใช้เวกเตอร์แรงดันที่ต่างกัน คือ

กรณีที่ 1 เมื่อเวกเตอร์อ้างอิงนั้นอยู่ในสามเหลี่ยมย่อยซึ่งประกอบด้วยเวกเตอร์  $a_1$  (PNP)  $b_1$  (PNO) และ  $c_1$  (POP) เราสามารถสร้างสัญญาณการสวิตช์ได้ดังรูป 3.7



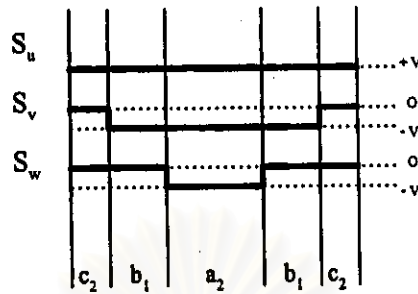
รูปที่ 3.7 สัญญาณการสวิตช์ที่ได้จากเวกเตอร์  $a_1$  (PNP)  $b_1$  (PNO) และ  $c_1$  (POP)

กรณีที่ 2 เมื่อเวกเตอร์อ้างอิงนั้นอยู่ในสามเหลี่ยมย่อยซึ่งประกอบด้วยเวกเตอร์  $b_1$  (PNO)  $c_1$  (POP) และ  $c_2$  (POO) เราสามารถสร้างสัญญาณการสวิตช์ได้ดังรูป 3.8



รูปที่ 3.8 สัญญาณการสวิตช์ที่ได้จากเวกเตอร์  $b_1$  (PNO)  $c_1$  (POP) และ  $c_2$  (POO)

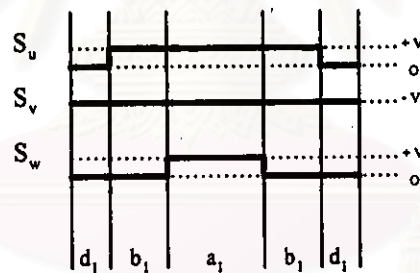
**กรณีที่ 3** เมื่อเวกเตอร์อ้างอิงนั้นอยู่ในสามเหลี่ยมย่อยซึ่งประกอบด้วยเวกเตอร์  $\bar{a}_2$  (PNN)  $\bar{b}_1$  (PNO) และ  $\bar{c}_2$  (POO) เราสามารถสร้างสัญญาณการสวิทช์ได้ดังรูป 3.9



รูปที่ 3.9 สัญญาณการสวิทช์ที่ได้จากเวกเตอร์  $\bar{a}_2$  (PNN)  $\bar{b}_1$  (PNO) และ  $\bar{c}_2$  (POO)

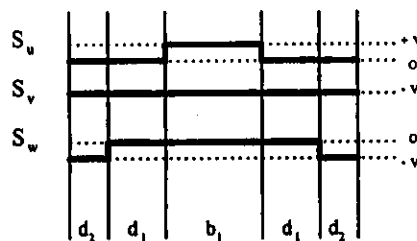
ข) ในโหมด 2 เวกเตอร์แรงดันที่ใช้คือ จะประกอบด้วยเวกเตอร์กลุ่ม a กลุ่ม b และ กลุ่ม d เช่นเดียวกับโหมด 1 เราจะยกตัวอย่างการเลือกใช้เวกเตอร์แรงดันที่ต่างกัน 3 กรณี คือ

**กรณีที่ 1** เมื่อเวกเตอร์อ้างอิงนั้นอยู่ในสามเหลี่ยมย่อยซึ่งประกอบด้วยเวกเตอร์  $\bar{a}_1$  (PNP)  $\bar{b}_1$  (PNO) และ  $\bar{d}_1$  (ONO) เราสามารถสร้างสัญญาณการสวิทช์ได้ดังรูป 3.10



รูปที่ 3.10 สัญญาณการสวิทช์ที่ได้จากเวกเตอร์  $\bar{a}_1$  (PNP)  $\bar{b}_1$  (PNO) และ  $\bar{d}_1$  (ONO)

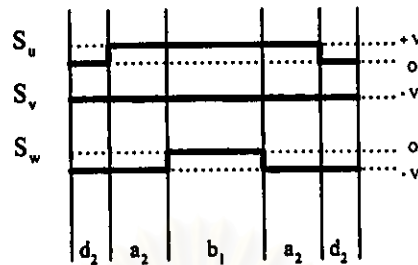
**กรณีที่ 2** เมื่อเวกเตอร์อ้างอิงนั้นอยู่ในสามเหลี่ยมย่อยซึ่งประกอบด้วยเวกเตอร์  $\bar{b}_1$  (PNO)  $\bar{d}_1$  (ONO) และ  $\bar{d}_2$  (ONN) เราสามารถสร้างสัญญาณการสวิทช์ได้ดังรูป 3.11



รูปที่ 3.11 สัญญาณการสวิทช์ที่ได้จากเวกเตอร์  $\bar{b}_1$  (PNO)  $\bar{d}_1$  (ONO) และ  $\bar{d}_2$  (ONN)



**กรณีที่ 3** เมื่อเวกเตอร์อ้างอิงนั้นอยู่ในสามเหลี่ยมย่อยซึ่งประกอบด้วยเวกเตอร์  $\vec{a}_2$  (PNN)  $\vec{b}_1$  (PNO) และ  $\vec{a}_2$  (ONN) เราสามารถสร้างสัญญาณการสวิตช์ได้ดังรูป 3.12

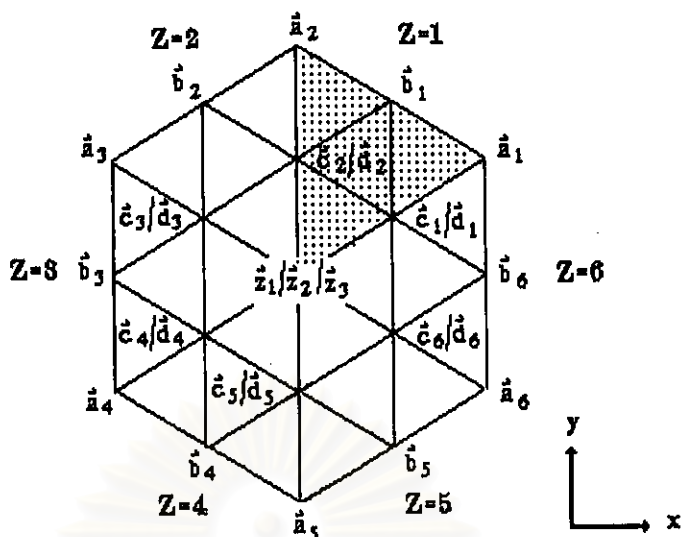


รูปที่ 3.12 สัญญาณการสวิตช์ที่ได้จากเวกเตอร์  $\vec{a}_2$  (PNN)  $\vec{b}_1$  (PNO) และ  $\vec{a}_2$  (ONN)

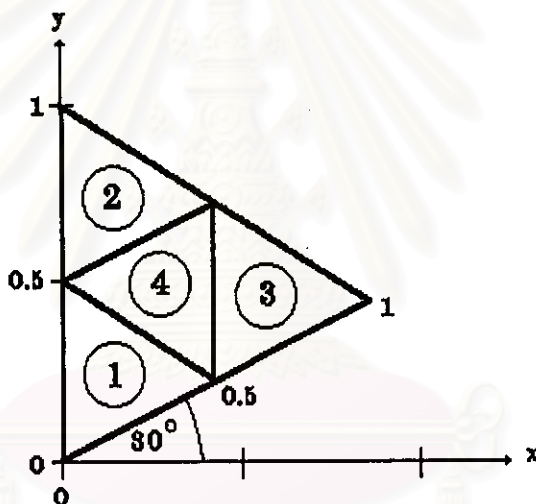
จะเห็นว่า จากสัญญาณการสวิตช์ที่ได้จากการแบ่งการสร้างสัญญาณการสวิตช์ทั้ง 2 กรณีนี้ เราพบว่า ไม่ว่าเวกเตอร์อ้างอิงจะอยู่ในสามเหลี่ยมย่อยใด การสร้างสัญญาณการสวิตช์ทั้ง 3 เฟสนั้นก็จะมี การเปลี่ยนแปลงของสถานะการสวิตช์ที่ละเฟสเท่ากัน และจะมีอยู่เฟสหนึ่งเสมอที่ไม่มีการสวิตช์เลย ซึ่งหมายความว่า การสูญเสียที่เกิดจากการสวิตช์จะมีค่าลดลง 1 ใน 3 เทียบกับวิธีการสวิตช์แบบสเปซเวกเตอร์ทั่วไป

#### การตรวจสอบตำแหน่งของเวกเตอร์อ้างอิง

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยเลือกใช้ขนาดและมุมเทียบกับแกนอ้างอิงเพื่อแสดงค่าของเวกเตอร์อ้างอิงซึ่งหมุนด้วยความเร็วเชิงมุม  $\omega$  ( ความถี่  $f$  ) ซึ่งทำให้เราทราบว่ามันอยู่ภายในสามเหลี่ยมย่อยใดได้โดยง่าย ในการตรวจสอบตำแหน่งของเวกเตอร์อ้างอิงนี้ มีจุดประสงค์เพื่อกำหนดรูปแบบของสัญญาณการสวิตช์และการคำนวณหาคาบของการสวิตช์ เมื่อพิจารณาเวกเตอร์แรงดันของอินเวอร์เตอร์สามระดับในรูปที่ 3.13 จะเห็นว่าเป็นการง่ายที่จะแบ่งเวกเตอร์แรงดันออกเป็น 6 โซน ( $Z=1,2,3...6$ ) และแต่ละโซนนั้นจะประกอบเซกเตอร์ย่อยอีก 4 เซกเตอร์ ดังรูปที่ 3.14 การแบ่งเช่นนี้เมื่อวิเคราะห์รูปแบบการสวิตช์ในแต่ละโซนจะได้ว่า ในแต่ละโซนจะมีรูปแบบการสวิตช์ที่เหมือนกันเพียงแต่สลับเฟสการสวิตช์ตามโซนนั้น ๆ ข้อคิดอันนี้สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้โดยเลือกที่จะคำนวณและกำหนดสัญญาณการสวิตช์ของโซนที่หนึ่งเป็นหลัก และจะใช้โซนนี้เป็นโซนอ้างอิงให้กับโซนอื่นต่อไป



รูปที่ 3.13 การแบ่งโซนของเวกเตอร์แรงดันของอินเวอร์เตอร์สามระดับ



รูปที่ 3.14 การแบ่งเซกเตอร์ย่อยของแต่ละโซน

ในการตรวจสอบโซนของเวกเตอร์อ้างอิงเพื่อกำหนดเวกเตอร์แรงดันที่จะใช้ในการสร้างแรงดันออก จะใช้เพียงค่าของมุมที่ทำกับแกนอ้างอิงเพื่อให้รู้ว่าเวกเตอร์แรงดันอ้างอิงอยู่โซนใด จากเวกเตอร์แรงดันรูปที่ 3.13 เนื่องจากเราแบ่งแต่ละโซนออกเท่ากันด้วยมุม 60 องศา จึงสามารถตรวจสอบว่า เวกเตอร์อ้างอิงซึ่งทำมุม  $\theta$  นั้นอยู่ในโซนใดได้ดังนี้

- กรณีที่  $30^\circ \leq \theta < 90^\circ$  เวกเตอร์อ้างอิงนั้นจะอยู่ในโซน 1
- กรณีที่  $90^\circ \leq \theta < 150^\circ$  เวกเตอร์อ้างอิงนั้นจะอยู่ในโซน 2
- กรณีที่  $150^\circ \leq \theta < 210^\circ$  เวกเตอร์อ้างอิงนั้นจะอยู่ในโซน 3
- กรณีที่  $210^\circ \leq \theta < 270^\circ$  เวกเตอร์อ้างอิงนั้นจะอยู่ในโซน 4
- กรณีที่  $270^\circ \leq \theta < 330^\circ$  เวกเตอร์อ้างอิงนั้นจะอยู่ในโซน 5
- กรณีที่  $0^\circ \leq \theta < 30^\circ$  และ  $330^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$  เวกเตอร์อ้างอิงนั้นจะอยู่ในโซน 6

สำหรับการตรวจสอบเซกเตอร์ของเวกเตอร์อ้างอิง เราจะพิจารณาจากรูป 3.14 ซึ่งจะได้ว่า ถ้าเราทำการแปลงจากการแสดงค่าเวกเตอร์แรงดันอ้างอิงจากรูปของขนาดและมุมมาอยู่ในรูปของค่าองค์ประกอบในแนวแกน X-Y (X,Y) แทน และแสดงขนาดของเวกเตอร์อ้างอิงคิดเทียบกับขนาดของเวกเตอร์แรงดันกลุ่ม a เราสามารถใช้ค่าองค์ประกอบ X และ Y นี้ตรวจสอบหาเซกเตอร์ได้ตามเงื่อนไขต่อไปนี้

```

if Y ≤ -X/√3 + 0.5 then
sector = 1
else
if X ≥ √3/4 then
sector = 3
else
if Y ≥ X/√3 + 0.5 then
sector = 2
else
sector = 4
endif
endif
endif

```

### การคำนวณหาคาบเวลาการสวิตช์

ในที่นี้ จะยกตัวอย่างเมื่อเวกเตอร์อ้างอิงอยู่ในสามเหลี่ยมใด ๆ อันประกอบด้วยเวกเตอร์แรงดัน  $\vec{V}_1$  เวกเตอร์แรงดัน  $\vec{V}_2$  และเวกเตอร์แรงดัน  $\vec{V}_3$  ดังรูปที่ 3.15 เราจะได้สมการความสัมพันธ์ 2 สมการคือ

1. ผลรวมของคาบเวลาการสวิตช์ของเวกเตอร์แรงดันทั้ง 3 ตัวจะมีเท่ากับคาบเวลาของความถี่สวิตซ์ ดังสมการที่ 3.3

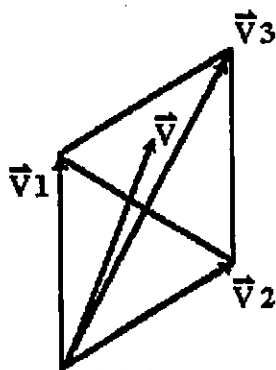
$$T_s = t_1 + t_2 + t_3 \quad (3.1)$$

$T_s$  คือ คาบเวลาของความถี่สวิตซ์

$t_1$  คือ คาบเวลาการสวิตช์ของเวกเตอร์แรงดัน  $\vec{V}_1$

$t_2$  คือ คาบเวลาการสวิตช์ของเวกเตอร์แรงดัน  $\vec{V}_2$

$t_3$  คือ คาบเวลาการสวิตช์ของเวกเตอร์แรงดัน  $\vec{V}_3$



รูปที่ 3.15 เวกเตอร์อ้างอิงอยู่ในสามเหลี่ยมย่อยใด ๆ ในสเปซเวกเตอร์

2. เวกเตอร์อ้างอิงจะต้องมีค่าเท่ากับค่าเฉลี่ยของเวกเตอร์แรงดันทั้ง 3 ตัว ตั้ง  
สมการที่ 3.2

$$\vec{V} * T_s = \vec{V}_1 * t_1 + \vec{V}_2 * t_2 + \vec{V}_3 * t_3 \quad (3.2)$$

$\vec{V}$  คือ เวกเตอร์อ้างอิง

เมื่อแก้สมการทั้ง 2 สมการนี้ เราจะได้คาบเวลาการสวิตช์ ( $t_1$ ,  $t_2$  และ  $t_3$ ) ของเวกเตอร์แรงดันแต่ละตัว และนำคาบเวลานี้ไปทำการสร้างสัญญาณการสวิตช์ดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อก่อน จากการศึกษาที่เราเลือกการใช้ตรวจสอบตำแหน่งของเวกเตอร์อ้างอิงดังรูปที่ 3.13 และรูปที่ 3.14 นั้น เราจึงสามารถสรุปขั้นตอนการคำนวณหาคาบเวลาการสวิตช์ในเซกเตอร์ต่าง ๆ ได้ดังต่อไปนี้ ในที่นี้เพื่อความง่ายเราจะคิดให้คาบเวลาการสวิตช์ ( $T_s$ ) มีค่าเท่ากับ 1 หน่วยเวลา

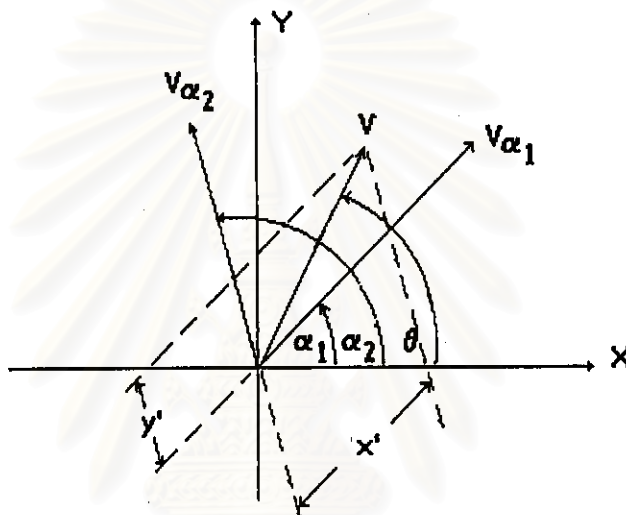
กรณีเซกเตอร์ที่ 1 เมื่อเวกเตอร์อ้างอิง ( $\vec{V}$ ) ในสเปซเวกเตอร์มีขนาดเล็กอยู่ภายในเซกเตอร์ที่ 1 อันประกอบด้วยเวกเตอร์ย่อยคือ เวกเตอร์กลุ่ม  $z$  และเวกเตอร์ขนาด 0.5 หน่วย 2 ตัวคือเวกเตอร์  $e_1$  และเวกเตอร์  $e_2$  หรือเวกเตอร์  $s_1$  และเวกเตอร์  $s_2$  เราสามารถคำนวณหาคาบเวลาการสวิตช์ดังนี้

1. แยกเวกเตอร์อ้างอิง ออกเป็น 2 ส่วนในแกนของเวกเตอร์ขนาด 0.5 หน่วยทั้ง 2 ตัว ซึ่งในที่นี้ให้เป็น  $V_{\alpha_1}$  และ  $V_{\alpha_2}$  โดยพิจารณาจากรูปที่ 3.16 กำหนดให้เวกเตอร์อ้างอิงมีขนาดเท่ากับ  $V$  และอยู่ตำแหน่งซึ่งทำมุม  $\theta$  กับแกนนอน เราสามารถแยกเวกเตอร์อ้างอิงออกเป็น 2 ส่วน ( $x', y'$ ) ในแนวแกนเวกเตอร์  $V_{\alpha_1}$  และเวกเตอร์  $V_{\alpha_2}$  ได้ดังนี้คือ

$$\begin{pmatrix} V \cos \theta \\ V \sin \theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha_1 & \cos \alpha_2 \\ \sin \alpha_1 & \sin \alpha_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \frac{1}{\sin(\alpha_2 - \alpha_1)} \begin{pmatrix} \sin \alpha_2 & -\cos \alpha_2 \\ -\sin \alpha_1 & \cos \alpha_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V \cos \theta \\ V \sin \theta \end{pmatrix}$$

$$= \frac{V}{\sin(\alpha_2 - \alpha_1)} \begin{pmatrix} \sin(\alpha_2 - \theta) \\ \sin(\theta - \alpha_1) \end{pmatrix} \quad (3.3)$$



รูปที่ 3.16 การแตกเวกเตอร์อ้างอิงในแนวแกนเวกเตอร์  $V_{\alpha_1}$  และเวกเตอร์  $V_{\alpha_2}$

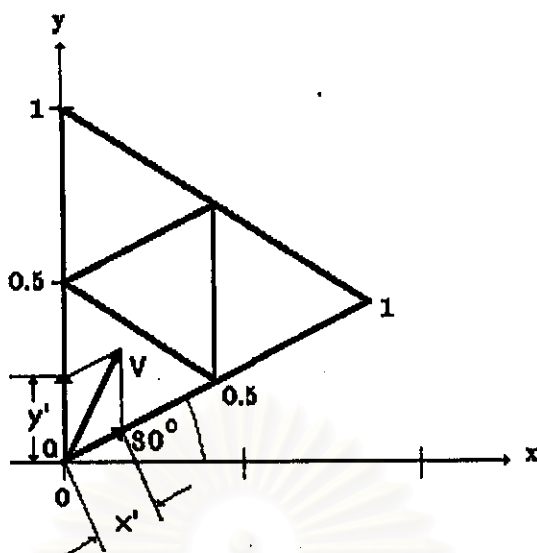
จากรูปที่ 3.17 การแตกเวกเตอร์อ้างอิงที่อยู่ภายในเซกเตอร์ที่ 1 จะได้ว่า ในที่นี้ เวกเตอร์  $\vec{e}_1$  หรือเวกเตอร์  $\vec{s}_1$  ก็คือเวกเตอร์  $V_{\alpha_1}$  และเวกเตอร์  $\vec{e}_2$  หรือเวกเตอร์  $\vec{s}_2$  คือเวกเตอร์  $V_{\alpha_2}$  ดังนั้น  $\alpha_1 = 30^\circ$  และ  $\alpha_2 = 90^\circ$  จะได้ว่า

$$x' = 2V/\sqrt{3} * \cos \theta \quad (3.4)$$

$$y' = 2V/\sqrt{3} * \sin(\theta - 30^\circ) \quad (3.5)$$

2. หาคาบเวลาการสวิตช์ของเวกเตอร์แต่ละตัว ได้ดังนี้

- คาบเวลาการสวิตช์ของเวกเตอร์  $\vec{e}_1$  หรือเวกเตอร์  $\vec{s}_1$  ( $t_1$ ) เท่ากับ  $2 * x'$
- คาบเวลาการสวิตช์ของเวกเตอร์  $\vec{e}_2$  หรือเวกเตอร์  $\vec{s}_2$  ( $t_2$ ) เท่ากับ  $2 * y'$
- คาบเวลาการสวิตช์ของเวกเตอร์ศูนย์ ( $t_3$ ) เท่ากับ  $1 - t_1 - t_2$



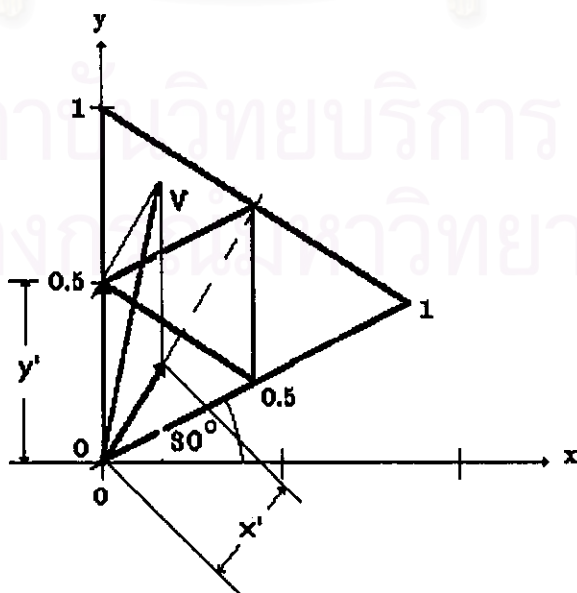
รูปที่ 3.17 การแตกเวกเตอร์อ้างอิงที่อยู่ภายในเชกเตอร์ที่ 1

**กรณีเชกเตอร์ที่ 2** เมื่อเวกเตอร์อ้างอิง ( $\vec{V}$ ) ในสเปซเวกเตอร์มีขนาดใหญ่อยู่ภายในเชกเตอร์ที่ 2 อันประกอบด้วยเวกเตอร์ย่อยคือ เวกเตอร์ขนาด 0.5 หน่วยคือเวกเตอร์  $\hat{e}_2$  หรือเวกเตอร์  $\hat{s}_2$  เวกเตอร์ขนาด  $\sqrt{3}/2$  หน่วยคือ  $\hat{e}_1$  และเวกเตอร์ขนาด 1 หน่วยคือเวกเตอร์  $\hat{s}_1$  เราสามารถคำนวณหาคาบเวลาการสวิตช์ดังนี้คือ

1. แยกเวกเตอร์อ้างอิง ออกเป็น 2 ส่วนในแนวแกนของเวกเตอร์  $\hat{e}_1$  และเวกเตอร์  $\hat{s}_2$  จากรูปที่ 3.18 เมื่อเวกเตอร์อ้างอิงมีขนาดเท่ากับ  $V$  และอยู่ตำแหน่งซึ่งทำมุม  $\theta$  กับแกนนอน โดยใช้สมการที่ 3.5 โดยให้  $\alpha_1 = 60^\circ$  และ  $\alpha_2 = 90^\circ$  จะได้ว่า

$$x' = 2V \cdot \cos \theta \quad (3.6)$$

$$y' = 2V \cdot \sin (\theta - 60^\circ) \quad (3.7)$$



รูปที่ 3.18 การแตกเวกเตอร์อ้างอิงที่อยู่ภายในเชกเตอร์ที่ 2

2. หาคาบเวลาการสวิตช์ของเวกเตอร์แต่ละตัว ได้ดังนี้

กำหนดให้คาบเวลาการสวิตช์ของเวกเตอร์  $\vec{b}_1$  เท่ากับ  $t_1$

คาบเวลาการสวิตช์ของเวกเตอร์  $\vec{c}_2$  หรือเวกเตอร์  $\vec{a}_2$  เท่ากับ  $t_2$

คาบเวลาการสวิตช์ของเวกเตอร์  $\vec{a}_2$  เท่ากับ  $t_3$

จะได้ว่า

$$t_1 = 2x' / \sqrt{3}$$

และจากสมการที่ 3.4 เราจะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$1 - t_1 = t_2 + t_3$$

เนื่องจากในกรณีนี้เวกเตอร์  $\vec{c}_2$  หรือเวกเตอร์  $\vec{a}_2$  กับเวกเตอร์  $\vec{a}_2$  มีทิศอยู่ในแนวแกน  $y$  เดียวกัน เราจึงได้ความสัมพันธ์ขององค์ประกอบในแกน  $y$  ดังนี้คือ

$$y' = 0.5t_2 + t_3$$

จึงแก้สมการหาค่าคาบเวลาการสวิตช์ดังนี้

$$t_2 = 2(1 - y' - t_1) = 2(1 - y' - 2x' / \sqrt{3})$$

$$t_3 = 1 - t_1 - t_2$$

กรณีเซกเตอร์ที่ 3 เมื่อเวกเตอร์อ้างอิง ( $\vec{V}$ ) ในสเปซเวกเตอร์มีขนาดใหญ่อยู่ภายในเซกเตอร์ที่ 3 อันประกอบด้วยเวกเตอร์ย่อยคือ เวกเตอร์ขนาด 0.5 หน่วยคือเวกเตอร์  $\vec{c}_1$  หรือเวกเตอร์  $\vec{a}_1$  เวกเตอร์ขนาด  $\sqrt{3}/2$  หน่วยคือ  $\vec{b}_1$  และเวกเตอร์ขนาด 1 หน่วยคือเวกเตอร์  $\vec{a}_1$  เราสามารถคำนวณหาคาบเวลาการสวิตช์ดังนี้คือ

1. แดกเวกเตอร์อ้างอิง ออกเป็น 2 ส่วนในแกนของเวกเตอร์  $\vec{b}_1$  และเวกเตอร์  $\vec{a}_1$  จากรูปที่ 3.19 เมื่อเวกเตอร์อ้างอิงมีขนาดเท่ากับ  $V$  และอยู่ตำแหน่งซึ่งทำมุม  $\theta$  กับแกนนอน โดยใช้สมการที่ 3.5 โดยให้  $\alpha_1 = 30^\circ$  และ  $\alpha_2 = 60^\circ$  จะได้ว่า

$$x' = 2V \sin(60^\circ - \theta) \quad (3.8)$$

$$y' = 2V \sin(\theta - 30^\circ) \quad (3.9)$$

2. หาคาบเวลาการสวิตช์ของเวกเตอร์แต่ละตัว ดังนี้

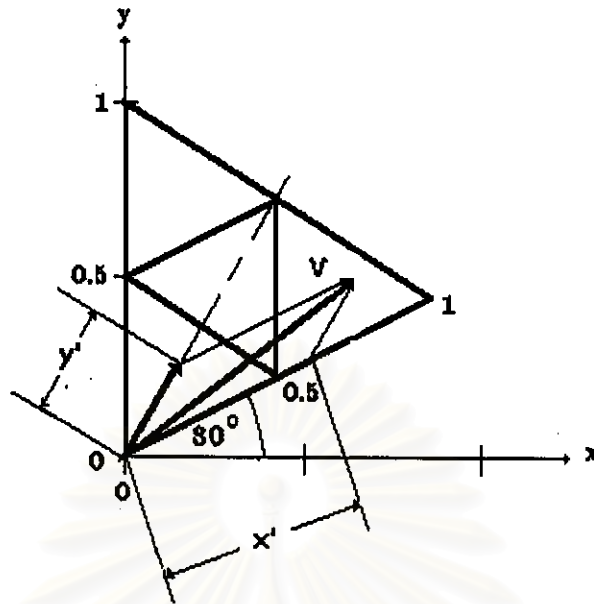
กำหนดให้คาบเวลาการสวิตช์ของเวกเตอร์  $\vec{a}_1$  เท่ากับ  $t_1$

คาบเวลาการสวิตช์ของเวกเตอร์  $\vec{c}_1$  หรือเวกเตอร์  $\vec{a}_1$  เท่ากับ  $t_2$

คาบเวลาการสวิตช์ของเวกเตอร์  $\vec{b}_1$  เท่ากับ  $t_3$

จะได้ว่า

$$t_3 = 2y' / \sqrt{3}$$



รูปที่ 3.19 การแตกเวกเตอร์อ้างอิงที่อยู่ภายในเชกเตอร์ที่ 3

และจากสมการที่ 3.4 เราจะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$1-t_3 = t_2 + t_1$$

เนื่องจากในกรณีนี้เวกเตอร์  $e_1$  หรือเวกเตอร์  $s_1$  กับเวกเตอร์  $x_1$  มีทิศอยู่ในแนวแกน  $x'$  เดียวกัน เราจึงได้ความสัมพันธ์ขององค์ประกอบในแกน  $x'$  ดังนี้คือ

$$x' = 0.5 \cdot t_2 + t_1$$

จึงแก้สมการได้คาบเวลาการสวิตช์ดังนี้

$$t_2 = 2 \cdot (1 - x' - t_3) = 2 \cdot (1 - x' - 2 \cdot y' / \sqrt{3})$$

$$t_1 = 1 - t_2 - t_3$$

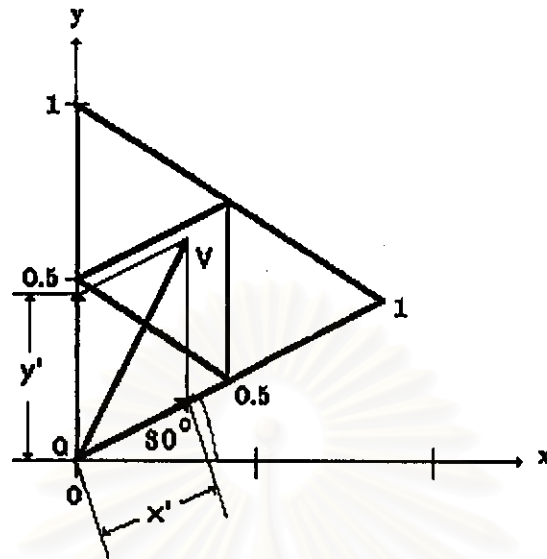
**กรณีเชกเตอร์ที่ 4** เมื่อเวกเตอร์อ้างอิง ( $\vec{V}$ ) ในสเปซเวกเตอร์มีขนาดใหญ่อยู่ภายในเชกเตอร์ที่ 4 อันประกอบด้วยเวกเตอร์ย่อยคือ เวกเตอร์ขนาด 0.5 หน่วย 2 ตัวคือเวกเตอร์  $e_1$  และเวกเตอร์  $e_2$  หรือเวกเตอร์  $s_1$  และเวกเตอร์  $s_2$  และเวกเตอร์ขนาด  $\sqrt{3}/2$  หน่วยคือ  $e_3$  เราสามารถคำนวณหาคาบเวลาการสวิตช์ดังนี้

1. แยกเวกเตอร์อ้างอิง ออกเป็น 2 ส่วนในแกนของเวกเตอร์ขนาด 0.5 หน่วยทั้ง 2 ตัว จากรูปที่ 3.20 เมื่อเวกเตอร์อ้างอิงมีขนาดเท่ากับ  $V$  และอยู่ตำแหน่งซึ่งทำมุม  $\theta$  กับแกนนอน โดยใช้สมการที่ 3.5 โดยให้  $\alpha_1 = 30^\circ$  และ  $\alpha_2 = 90^\circ$  จะได้ว่า

$$x' = 2V / \sqrt{3} \cdot \cos \theta \quad (3.10)$$

$$y' = 2V / \sqrt{3} \cdot \sin (\theta - 30^\circ) \quad (3.11)$$





รูปที่ 3.20 การแตกเวกเตอร์อ้างอิงที่อยู่ภายในเซกเตอร์ที่ 4

2. หาคาบเวลาการสวิตช์ของเวกเตอร์แต่ละตัว ดังนี้

กำหนดให้คาบเวลาการสวิตช์ของเวกเตอร์  $\hat{c}_1$  หรือเวกเตอร์  $\hat{s}_1$  เท่ากับ  $t_1$

คาบเวลาการสวิตช์ของเวกเตอร์  $\hat{c}_2$  หรือเวกเตอร์  $\hat{s}_2$  เท่ากับ  $t_2$

คาบเวลาการสวิตช์ของเวกเตอร์  $\hat{c}_3$  เท่ากับ  $t_3$

เนื่องจาก เวกเตอร์  $\hat{c}_1$  เท่ากับเวกเตอร์  $\hat{c}_1$  บวกกับเวกเตอร์  $\hat{c}_2$  หรือ เวกเตอร์  $\hat{s}_1$  บวกกับเวกเตอร์  $\hat{s}_2$  เราจึงได้ความสัมพันธ์ขององค์ประกอบในแต่ละแกนดังนี้คือ

$$x' = 0.5*t_1 + 0.5*t_3$$

$$y' = 0.5*t_2 + 0.5*t_3$$

และจากสมการที่ 3.4 เรามีความสัมพันธ์ที่ว่า

$$1 - t_1 = t_2 + t_3$$

ดังนั้น เราจึงแก้สมการหาค่าคาบเวลาการสวิตช์ได้ดังนี้

$$t_1 = 1 - 2*y'$$

$$t_2 = 1 - 2*x'$$

$$t_3 = 1 - t_1 - t_2 = 2*x' + 2*y' - 1$$

### การคำนวณหากระแสในวงจรและการเปลี่ยนแปลงของแรงดันในวงจร

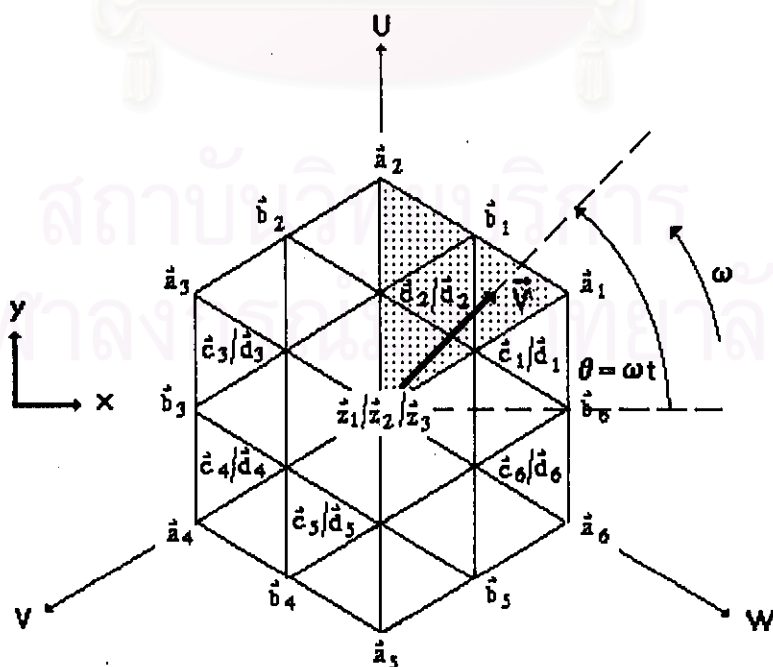
ในที่นี้เราจะแสดงการคำนวณหากระแสในวงจรและแรงดันในวงจรที่เปลี่ยนแปลงอันเป็นผลจากการกำเนิดรูปแบบการสวิตช์ที่ใช้เวกเตอร์กลุ่ม b เวกเตอร์กลุ่ม c หรือเวกเตอร์กลุ่ม d โดยจะยกเวกเตอร์แรงดันของอินเวอร์เตอร์สามระดับที่กล่าวมาแล้วมาในบทที่ 2 มาแสดงใหม่ดังรูปที่ 3.21 กำหนดให้เวกเตอร์อ้างอิง ( $\vec{V}$ ) ขนาด  $\sqrt{3}V$  (V เป็นค่า rms) หมุนวนเข็มนาฬิกาด้วยความเร็วเชิงมุม  $\omega = 2\pi f$  ทำมุมกับแกน X เท่ากับ  $\theta = \omega t$  เราจะได้ความสัมพันธ์ของกระแสไหลและเวกเตอร์อ้างอิงเพื่อใช้ในการคำนวณดังต่อไปนี้

เวกเตอร์แรงดันอ้างอิง แสดงในรูปของสเปซเวกเตอร์ได้เป็น

$$\vec{V} = \sqrt{3}V e^{j\omega t} = \begin{pmatrix} \sqrt{3}V \cos \omega t \\ \sqrt{3}V \sin \omega t \end{pmatrix}$$

ในที่นี้กำหนดให้กระแสไหลมีเฟสล่าช้าถึงแรงดันเป็นมุม  $\gamma$  เราจะได้เวกเตอร์ของกระแสไหล แสดงได้ดังนี้

$$\vec{I} = \sqrt{3}I e^{j(\omega t - \gamma)} = \begin{pmatrix} \sqrt{3}I \cos(\omega t - \gamma) \\ \sqrt{3}I \sin(\omega t - \gamma) \end{pmatrix}$$



รูปที่ 3.21 เวกเตอร์แรงดันของอินเวอร์เตอร์สามระดับ

เมื่อคิดย้อนกลับไปที่ 3 เฟส เราจะได้ สมการแรงดันเฟสข้างอิงดังนี้

$$v_u = \sqrt{2} V \cos(\omega t - 90^\circ)$$

$$v_v = \sqrt{2} V \cos(\omega t - 120^\circ - 90^\circ)$$

$$v_w = \sqrt{2} V \cos(\omega t + 120^\circ - 90^\circ)$$

และ สมการของกระแสไหลคดังนี้

$$i_u = \sqrt{2} I \cos(\omega t - 90^\circ - \gamma)$$

$$i_v = \sqrt{2} I \cos(\omega t - 120^\circ - 90^\circ - \gamma)$$

$$i_w = \sqrt{2} I \cos(\omega t + 120^\circ - 90^\circ - \gamma)$$

เราจะพิจารณาแยกเป็น 2 กรณีตามขนาดเวกเตอร์ข้างอิงดังต่อไปนี้

1. กรณีที่เวกเตอร์ข้างอิงหมุนอยู่ในหกเหลี่ยมในของสเปซเวกเตอร์ เมื่อพิจารณาดาวรางที่ 2.3 ของบทที่ 2 จะพบว่า ในทุก ๆ โชน กระแสนิวทรัลที่เกิดจากการเลือกใช้เฉพาะเวกเตอร์กลุ่ม c หรือเวกเตอร์กลุ่ม d อย่างใดอย่างหนึ่งในการสร้างแรงดันออก จะมีลักษณะที่เหมือนกัน ทั้งนี้ก็เนื่องจาก แต่ละโชนจะมีการเลื่อนเฟสกันอยู่ 60 องศา และกระแสนิวทรัลที่เกิดในแต่ละโชนนั้น ๆ ก็จะมีเวกเตอร์เลื่อนเฟสไปด้วยมุมที่เท่ากันด้วย ยกตัวอย่างเช่น ณ เวลา  $t = t'$  เมื่อเวกเตอร์แรงดันข้างอิงตกอยู่ในโชนที่ 1 และกระแสนิวทรัลที่เกิดจากเวกเตอร์  $c_1$  และ  $c_2$  คือกระแส  $i_v(t')$  และ  $-i_u(t')$  ตามลำดับ และ ณ เวลา  $t = t''$  เมื่อเวกเตอร์ข้างอิงเคลื่อนที่ไปเป็นมุม 60 องศา ( $\omega t'' = \omega t' + 60^\circ$ ) ไปอยู่ในโชนที่ 2 กระแสนิวทรัลที่เกิดจากเวกเตอร์  $c_2$  และ  $c_3$  คือกระแส  $-i_u(t'')$  และ  $i_w(t'')$  ตามลำดับ แทน จากลักษณะสมมาตรของกระแส 3 เฟส เราจะได้ว่า  $i_v(t') = -i_u(t'')$  และ  $-i_u(t') = i_w(t'')$  ซึ่งก็หมายความว่า กระแสนิวทรัลที่เกิดขึ้นในโชนที่ 2 นี้ จะมีค่าเหมือนกับกระแสนิวทรัลในโชนที่ 1 ทุกประการ ในโชนอื่น ๆ เราก็พิสูจน์ได้ในทำนองเดียวกันเราจึงสามารถพิจารณาเพียงโชนที่ 1 เพียงโชนเดียว และสามารถพิจารณาเฉพาะเวกเตอร์กลุ่ม c หรือเวกเตอร์กลุ่ม d เนื่องจากให้ผลของกระแสนิวทรัลที่มีเครื่องหมายตรงกันข้าม

ในที่นี้ จะพิจารณาเมื่อเวกเตอร์ข้างอิง ( $\vec{V}$ ) อยู่ในโชนที่ 1 อันประกอบด้วยเวกเตอร์  $c_1$  เวกเตอร์  $c_2$  และเวกเตอร์กลุ่ม z จะได้ว่า กระแสนิวทรัลอันเกิดเนื่องจากการใช้เวกเตอร์  $c_1$  และเวกเตอร์  $c_2$  คือกระแส  $i_u$  และกระแส  $-i_u$  ตามลำดับดังที่ได้กล่าวมาแล้ว จากผลการคำนวณคาบเวลาการสวิตช์เมื่อเวกเตอร์ข้างอิงอยู่ในเซกเตอร์ที่ 1 ในหัวข้อก่อน เราได้คาบเวลาการสวิตช์ของเวกเตอร์  $c_1(t_1)$  และคาบเวลาการสวิตช์ของเวกเตอร์  $c_2(t_2)$  มีค่าดังสมการ 3.4 และ 3.5 ทั้งนี้  $m = \sqrt{3} V / (\sqrt{2/3} * E_d)$  และ  $E_d$  คือแรงดันบัสไฟตรง

$$t_1 = 2 * x' = 4 * m * \cos(\omega t) / \sqrt{3} \quad (3.12)$$

$$t_2 = 2 * y' = 4 * m * \sin(\omega t - 30^\circ) / \sqrt{3} \quad (3.13)$$

ดังนั้น เมื่อคิดว่า ความถี่สวิตชิงสูงมาก ( $f_s = 1/T_s$ ) จะได้ว่า ค่ากระแสฉนวนเฉลี่ย ( $\bar{i}_0$ ) ในช่วงเวลา  $T_s$  นี้ จะคำนวณได้จากค่าประจุไฟฟ้า ( $\Delta q$ ) ที่เกิดขึ้นจากผลของกระแสฉนวน ดังนี้

$$\begin{aligned}\Delta q &= \bar{i}_0(t)T_s = (i_v \cdot t_1 - i_u \cdot t_2) \cdot T_s \\ \therefore \bar{i}_0(t) &= (i_v \cdot t_1 - i_u \cdot t_2) \\ &= \sqrt{2} I \cos(\omega t - 120^\circ - 90^\circ - \gamma) \cdot (4 \cdot m \cdot \cos(\omega t) / \sqrt{3}) + \\ &\quad \sqrt{2} I \cos(\omega t - 90^\circ - \gamma + 180^\circ) \cdot (4 \cdot m \cdot \sin(\omega t - 30^\circ) / \sqrt{3}) \\ &= 4 \sqrt{2/3} \cdot I \cdot m \cdot [-\cos(30^\circ - \omega t + \gamma) \cdot \cos(\omega t) + \sin(\gamma - \omega t) \cdot \sin(\omega t - 30^\circ)] \\ &= 4 \sqrt{2/3} \cdot I \cdot m \cdot [-\sqrt{3}/2 \cdot \cos(\gamma)] \\ &= -2 \sqrt{2} \cdot I \cdot m \cdot \cos(\gamma)\end{aligned}\tag{3.14}$$

เราจะพบว่ากระแสฉนวนเฉลี่ย ( $\bar{i}_0$ ) ณ เวลา  $t$  ใด ๆ จะมีค่าคงที่ ซึ่งขึ้นกับขนาดของกระแสโหลด ค่าดัชนีการมอดูเลต ( $m$ ) และค่าตัวประกอบกำลัง ( $\cos(\gamma)$ ) เท่านั้น และเราสามารถคำนวณหาค่าการเปลี่ยนแปลงของแรงดันฉนวนในช่วงเวลา  $\Delta t$  ได้มีค่าเท่ากับ  $\Delta V_o = \bar{i}_0 \cdot \Delta t / (2C)$

2. กรณีที่เวกเตอร์อ้างอิงหมุนอยู่นอกหกเหลี่ยมในของสเปซเวกเตอร์ เมื่อพิจารณาตารางที่ 2.3 ของบทที่ 2 จะพบว่า กระแสฉนวนที่เกิดจากการเลือกใช้เฉพาะเวกเตอร์กลุ่ม  $c$  หรือเวกเตอร์กลุ่ม  $d$  อย่างใดอย่างหนึ่งในการสร้างแรงดัน จะมีลักษณะที่สมมาตรกันในทุก ๆ โชน ดังที่ได้กล่าวในกรณีก่อนหน้านี้ เราจึงสามารถพิจารณาเพียงโชนที่ 1 เพียงโชนเดียวและสามารถพิจารณาเฉพาะเวกเตอร์กลุ่ม  $c$  ได้ ส่วนเวกเตอร์กลุ่ม  $b$  จะพบว่าทุกโชนจะให้ค่าของกระแสฉนวนที่มีค่าเท่ากัน แต่มีเครื่องหมายสลับกันไป ดังนั้นเมื่อเวกเตอร์อ้างอิงหมุนครบ 1 รอบจะได้ว่าค่าผลรวมของการเปลี่ยนแปลงแรงดันฉนวนที่เกิดขึ้นใน 6 โชนจะเท่ากับ 0 ดังได้อธิบายไว้ในหัวข้อก่อน เราจะพิจารณาผลของกระแสฉนวนแยกแต่ละเซกเตอร์ดังนี้

- เซกเตอร์ที่ 2 พิจารณาเมื่อเวกเตอร์อ้างอิง ( $\vec{V}$ ) อยู่ในโชนที่ 1 อันประกอบด้วยเวกเตอร์  $\vec{v}_2$ , เวกเตอร์  $\vec{v}_1$  และเวกเตอร์  $\vec{v}_2$  จะได้ว่ากระแสฉนวนอื่นเนื่องจากเวกเตอร์  $\vec{v}_1$  คือกระแส  $i_u$  และเวกเตอร์  $\vec{v}_2$  คือกระแส  $-i_u$

จากผลการคำนวณคาบเวลาสวิตช์เมื่อเวกเตอร์อ้างอิงอยู่ในเซกเตอร์ที่ 2 ในหัวข้อก่อน เราได้คาบเวลาการสวิตช์ของเวกเตอร์  $\vec{v}_1(t_1)$  และคาบเวลาการสวิตช์ของเวกเตอร์  $\vec{v}_2(t_2)$  มีค่าดังนี้

$$\begin{aligned}t_1 &= 2 \cdot x' / \sqrt{3} \\ &= 4 \cdot m \cdot \cos(\omega t) / \sqrt{3}\end{aligned}\tag{3.15}$$

$$\begin{aligned}t_2 &= 2 \cdot (1 - y' - t_1) \\ &= 2 \cdot [1 - 2 \cdot m \cdot \sin(\omega t - 60^\circ) - 4 \cdot m \cdot \cos(\omega t) / \sqrt{3}] \\ &= 2 - 4 \cdot m \cdot [\sin(\omega t - 60^\circ) - 2 / \sqrt{3} \cdot \cos(\omega t)]\end{aligned}\tag{3.16}$$

ดังนั้น เมื่อคิดว่า ความถี่สวิตชิงสูงมาก ( $f_s=1/T_s$ ) จะได้ว่า ค่ากระแสฉนวนเฉลี่ย ( $\bar{i}_o$ ) ในช่วงเวลา  $T_s$  นี้ จะคำนวณได้จากค่าประจุไฟฟ้า ( $\Delta q$ ) ที่เกิดขึ้นจากผลของกระแสฉนวน ดังนั้น  
กรณีของเวกเตอร์  $\bar{i}_1$

$$\Delta q = \bar{i}_o(t)T_s = i_w * t1 * T_s$$

$$\begin{aligned} \therefore \bar{i}_o(t) &= i_w * t1 \\ &= \sqrt{2} I \cos(\omega t + 120^\circ - 90^\circ - \gamma) * (4 * m * \cos(\omega t)) / \sqrt{3} \\ &= 4 \sqrt{2} / 3 * I * m * [\cos(30^\circ + \omega t - \gamma) * \cos(\omega t)] \\ &= 2 \sqrt{2} / 3 * I * m * [\cos(2\omega t + 30^\circ - \gamma) + \cos(\gamma - 30^\circ)] \end{aligned} \quad (3.17)$$

กรณีของเวกเตอร์  $\bar{i}_2$

$$\Delta q = \bar{i}_o(t)T_s = -i_u * t2 * T_s$$

$$\begin{aligned} \therefore \bar{i}_o(t) &= -i_u * t2 \\ &= -\sqrt{2} I \cos(\omega t - 90^\circ - \gamma) * [2 - 4 * m * [\sin(\omega t - 60^\circ) - 2 / \sqrt{3} * \cos(\omega t)]] \\ &= -2 \sqrt{2} I \sin(\omega t - \gamma) + 4 \sqrt{2} * I * m * [\sin(\omega t - \gamma) * \sin(\omega t - 60^\circ) \\ &\quad - 2 / \sqrt{3} * \sin(\omega t - \gamma) * \cos(\omega t)] \\ &= -2 \sqrt{2} I \sin(\omega t - \gamma) + 2 \sqrt{2} * I * m * [-\cos(2\omega t - \gamma - 60^\circ) + \cos(\gamma - 60^\circ) \\ &\quad + 2 / \sqrt{3} * (\sin(\gamma) + \sin(\gamma - 2\omega t))] \end{aligned} \quad (3.18)$$

- เซกเตอร์ที่ 3 พิจารณาเมื่อเวกเตอร์อ้างอิง ( $\bar{V}$ ) อยู่ในโซนที่ 1 อันประกอบด้วยเวกเตอร์  $\bar{a}_1$ ,  
เวกเตอร์  $\bar{b}_1$  และเวกเตอร์  $\bar{c}_1$  จะได้ว่า กระแสฉนวนอื่นเนื่องจากเวกเตอร์  $\bar{b}_1$  คือกระแส  $i_w$  และ  
เวกเตอร์  $\bar{c}_1$  คือกระแส  $i_u$

จากผลการคำนวณคาบเวลาสวิตชิงเมื่อเวกเตอร์อ้างอิงอยู่ในเซกเตอร์ที่ 3 ในหัวข้อก่อน เรา  
ได้คาบเวลาการสวิตชิงของเวกเตอร์  $\bar{b}_1$  ( $t3$ ) และคาบเวลาการสวิตชิงของเวกเตอร์  $\bar{c}_2$  ( $t2$ ) มีค่าดังนี้

$$t3 = 2 * y' / \sqrt{3} = 4 * m * \sin(\omega t - 30^\circ) / \sqrt{3} \quad (3.19)$$

$$\begin{aligned} t2 &= 2 * (1 - x' - t3) \\ &= 2 * [1 - 2m * \sin(60^\circ - \omega t) - 4 * m * \sin(\omega t - 30^\circ) / \sqrt{3}] \\ &= 2 - 4 * m * [\sin(60^\circ - \omega t) - 2 / \sqrt{3} * \sin(\omega t - 30^\circ)] \end{aligned} \quad (3.20)$$

ดังนั้น เมื่อคิดว่าความถี่สวิตชิงสูงมาก ( $f_s=1/T_s$ ) จะได้ว่า ค่ากระแสฉนวนเฉลี่ย ( $\bar{i}_o$ ) ในช่วง  
เวลา  $T_s$  นี้ จะคำนวณได้จากค่าประจุไฟฟ้า ( $\Delta q$ ) ที่เกิดขึ้นจากผลของกระแสฉนวน ดังนั้น

กรณีของเวกเตอร์  $\bar{i}_1$

$$\Delta q = \bar{i}_o(t)T_s = i_w * t3 * T_s$$

$$\begin{aligned} \therefore \bar{i}_o(t) &= i_w * t3 \\ &= \sqrt{2} I \cos(\omega t + 120^\circ - 90^\circ - \gamma) * (4 * m * \sin(\omega t - 30^\circ)) / \sqrt{3} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= 4\sqrt{2/3} * I * m * [\cos(30^\circ + \omega t - \gamma) * \sin(\omega t - 30^\circ)] \\
&= 2\sqrt{2/3} * I * m * [\sin(2\omega t - \gamma) - \sin(60^\circ - \gamma)] \quad (3.21)
\end{aligned}$$

กรณีของเวกเตอร์  $\bar{c}_2$

$$\Delta q = \bar{i}_0(t) T_s = i_w * t_2 * T_s$$

$$\begin{aligned}
\therefore \bar{i}_0(t) &= i_w * t_2 \\
&= \sqrt{2} I \cos(\omega t - 120^\circ - 90^\circ - \gamma) * [2 - 4 * m * [\sin(60^\circ - \omega t) - 2/\sqrt{3} * \sin(\omega t - 30^\circ)]] \\
&= -2\sqrt{2} I \cos(30^\circ - \omega t + \gamma) + 4\sqrt{2} * I * m * [\cos(30^\circ - \omega t + \gamma) * \cos(30^\circ + \omega t) \\
&\quad - 2/\sqrt{3} * \cos(30^\circ - \omega t + \gamma) * \sin(\omega t - 30^\circ)] \\
&= -2\sqrt{2} I \cos(-\gamma + \omega t - 30^\circ) + 2\sqrt{2} * I * m * [\cos(2\omega t - \gamma) + \cos(\gamma + 60^\circ) \\
&\quad - 2/\sqrt{3} * (\sin(\gamma) - \sin(\gamma - 2\omega t + 60^\circ))] \quad (3.22)
\end{aligned}$$

- เซกเตอร์ที่ 4 พิจารณาเมื่อเวกเตอร์อ้างอิง ( $\bar{V}$ ) อยู่ในโซนที่ 1 อันประกอบด้วยเวกเตอร์  $\bar{c}_1$ , เวกเตอร์  $\bar{c}_2$  และเวกเตอร์  $\bar{c}_3$  จะได้ว่ากระแสในทรานส์ฟอร์มเมอร์เนื่องจากเวกเตอร์  $\bar{c}_1$  คือกระแส  $i_w$  เวกเตอร์  $\bar{c}_2$  คือกระแส  $i_u$  และเวกเตอร์  $\bar{c}_3$  คือกระแส  $-i_v$

จากผลการคำนวณคาบเวลาสวิตช์จริงเมื่อเวกเตอร์อ้างอิงอยู่ในเซกเตอร์ที่ 4 ในหัวข้อก่อน เราได้คาบเวลาการสวิตช์ของเวกเตอร์  $\bar{c}_1$  ( $t_1$ ) คาบเวลาการสวิตช์ของเวกเตอร์  $\bar{c}_2$  ( $t_2$ ) และคาบเวลาการสวิตช์ของเวกเตอร์  $\bar{c}_3$  ( $t_3$ ) มีค่าดังนี้

$$t_1 = 1 - 2 * y' = 1 - 4 * m * \sin(\omega t - 30^\circ) / \sqrt{3} \quad (3.23)$$

$$t_2 = 1 - 2 * x' = 1 - 4 * m * \cos(\omega t) / \sqrt{3} \quad (3.24)$$

$$\begin{aligned}
t_3 &= 1 - t_1 - t_2 \\
&= 4/\sqrt{3} * m * [\cos(\omega t) + \sin(\omega t - 30^\circ)] - 1 \quad (3.25)
\end{aligned}$$

ดังนั้น เมื่อคิดว่าความถี่สวิตช์สูงมาก ( $f_s = 1/T_s$ ) จะได้ว่า ค่ากระแสในทรานส์ฟอร์มเมอร์ ( $\bar{i}_0$ ) ในช่วงเวลา  $T_s$  นี้ จะคำนวณได้จากค่าประจุไฟฟ้า ( $\Delta q$ ) ที่เกิดขึ้นจากผลของกระแสในทรานส์ฟอร์มเมอร์ ดังนี้

กรณีของเวกเตอร์  $\bar{c}_1$

$$\Delta q = \bar{i}_0(t) T_s = i_w * t_1 * T_s$$

$$\begin{aligned}
\therefore \bar{i}_0(t) &= i_w * t_1 \\
&= \sqrt{2} I \cos(\omega t + 120^\circ - 90^\circ - \gamma) * [4/\sqrt{3} * m * [\cos(\omega t) + \sin(\omega t - 30^\circ)] - 1] \\
&= 4\sqrt{2/3} * I * m * [\cos(30^\circ + \omega t - \gamma) * \cos(\omega t) + \cos(30^\circ + \omega t - \gamma) * \sin(\omega t - 30^\circ) \\
&\quad - \sqrt{2} I \cos(30^\circ + \omega t - \gamma) \\
&= 2\sqrt{2/3} * I * m * [\cos(2\omega t + 30^\circ - \gamma) + \cos(\alpha - 30^\circ) + \sin(2\omega t - \gamma) \\
&\quad - \sin(60^\circ - \gamma)] - \sqrt{2} I \cos(30^\circ - \omega t + \gamma) \quad (3.26)
\end{aligned}$$

กรณีของเวกเตอร์  $\vec{c}_1$  และ  $\vec{c}_2$

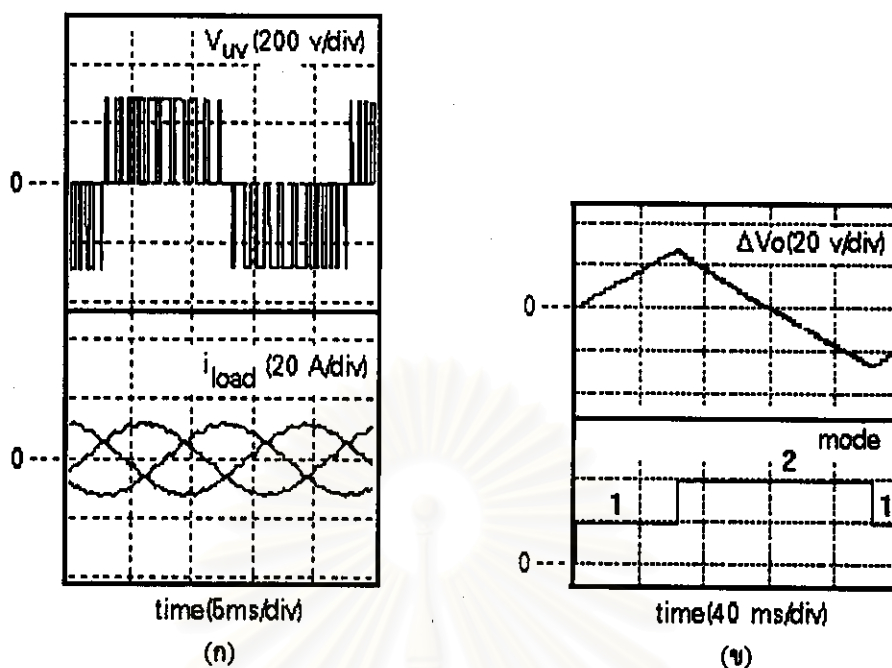
$$\Delta q = \bar{i}_0(t)T_s = (i_v * t_1 - i_u * t_2) * T_s$$

$$\begin{aligned} \therefore \bar{i}_0(t) &= (i_v * t_1 - i_u * t_2) \\ &= \sqrt{2} I \cos(\omega t - 120^\circ - 90^\circ - \gamma) * (1 - 4 * m * \sin(\omega t - 30^\circ) / \sqrt{3}) + \\ &\quad \sqrt{2} I \cos(\omega t - 90^\circ - \gamma + 180^\circ) * (1 - 4 * m * \cos(\omega t) / \sqrt{3}) \\ &= \sqrt{2} I [\cos(\omega t - 120^\circ - 90^\circ - \gamma) + \cos(\omega t - 90^\circ - \gamma + 180^\circ)] \\ &\quad - 4 \sqrt{2} / 3 * I * m * [-\cos(30^\circ - \omega t + \gamma) * \sin(\omega t - 30^\circ) + \sin(\gamma - \omega t) \cos(\omega t)] \\ &= \sqrt{2} I [-\cos(30^\circ - \omega t + \gamma) + \sin(\gamma - \omega t)] \\ &\quad - 2 \sqrt{2} / 3 * I * m * [\sin(\gamma - 2\omega t + 60^\circ) + \sin(\gamma - 2\omega t)] \end{aligned} \quad (3.27)$$

จะเห็นว่า กรณีนี้กระแสเหนี่ยวนำเป็นผลจากเวกเตอร์กลุ่ม b หรือเวกเตอร์กลุ่ม c หรือเวกเตอร์กลุ่ม d ของแต่ละเซกเตอร์เป็นฟังก์ชันที่ขึ้นกับเวลา ดังนั้น การจะหาค่ากระแสเหนี่ยวนำนั้น เราจะต้องพิจารณาถึงความถี่สวิตซิงที่ใช้ด้วย โดยถ้าความถี่สวิตซิงต่ำเมื่อเทียบกับความถี่ของเวกเตอร์อ้างอิงอันเป็นผลให้มีการสร้างสัญญาณการสวิตซิงเป็นจำนวนน้อยครั้งต่อหนึ่งเซกเตอร์ เราจะสามารถนำสูตรข้างต้นไปใช้ได้เลย แต่ถ้าความถี่สวิตซิงสูงเมื่อเทียบกับความถี่ของเวกเตอร์ อันเป็นผลให้มีการสร้างสัญญาณการสวิตซิงเป็นจำนวนมากครั้งต่อหนึ่งเซกเตอร์ เราจะต้องนำสูตรข้างต้นมาอินทิเกรตแล้วหารด้วยหนึ่งใน 6 ส่วนของคาบเวลาของเวกเตอร์อ้างอิง เพื่อหาค่าเฉลี่ยของกระแสเหนี่ยวนำ และสามารถหาแรงดันเหนี่ยวนำที่เปลี่ยนแปลงในช่วงเวลา  $\Delta t$  ได้มีค่าเท่ากับ  $\Delta V_o = i_{0av} * \Delta t / (2C)$

### ผลของการจำลองระบบ

โดยอาศัยวิธีการเลือกเวกเตอร์แรงดัน การคำนวณหาค่าคาบเวลาการสวิตซิงของแต่ละเวกเตอร์ รวมทั้งวิธีการสร้างสัญญาณการสวิตซิงที่ได้กล่าวมาทั้งหมดนี้ ผู้วิจัยได้ทำการจำลองระบบในรูปที่ 3.4 ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อวิเคราะห์การทำงานของอินเวอร์เตอร์สามระดับที่เวกเตอร์อ้างอิงความถี่ 50 Hz ขนาดต่าง ๆ และได้ผลการจำลองดังรูปที่ 3.22 และรูปที่ 3.23 ในที่นี้ แรงดันบัสไฟตรงได้จากการเรียงกระแสแรงดันไฟสลับ 3 เฟส ขนาด 380 V ค่าของตัวเก็บประจุ C1 และ C2 ที่ใช้แต่ละตัวมีขนาด 4000  $\mu F$  และเราจะทำการควบคุมแรงดันเหนี่ยวนำให้เปลี่ยนแปลงได้ภายในขอบเขตเท่ากับ 10 เปอร์เซ็นต์ของครึ่งหนึ่งของแรงดันบัสไฟตรง (มีค่าประมาณ 27 V) สวิตซิงที่ใช้ในการจำลองเป็นแบบอุดมคติโดยมีความถี่สวิตซิงเท่ากับ 900 Hz และโหลดของอินเวอร์เตอร์คือแบบ  $\Delta$  ( $R=15 \Omega$  และ  $L=82.7 \text{ mH}$ )

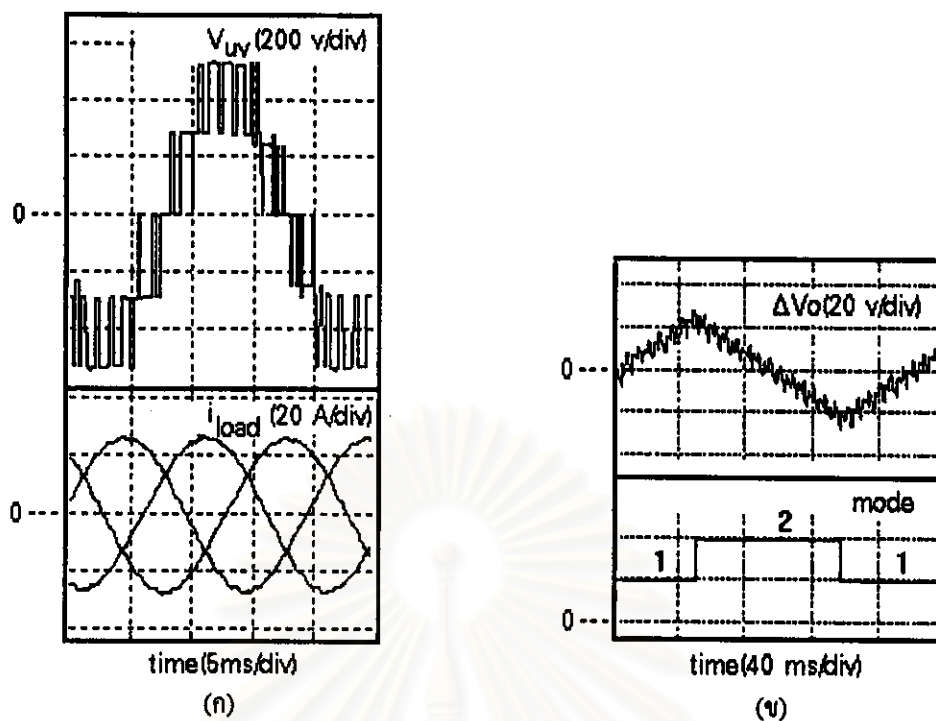


รูปที่ 3.22 ผลการจำลองการทำงานเมื่อเวกเตอร์อ้างอิงมีค่าเท่ากับ 140 V 50Hz

รูปที่ 3.22 (ก) เป็นผลที่ได้ในกรณีที่ใช้เวกเตอร์อ้างอิงมีขนาดเล็ก(140 V) ซึ่งจะใช้เฉพาะเวกเตอร์กลุ่ม c กลุ่ม d และกลุ่ม z เท่านั้น การทำงานในกรณีนี้จะมีลักษณะรูปคลื่นคล้ายกับอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับทั่วไป ในรูปที่ 3.22 (ข) เราจะสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงของระดับแรงดันนิวทรัลและโหมคการทำงานซึ่งจะสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ที่ผ่านมา คือ ในกรณีที่โหลดรับพลังงานจากแหล่งจ่ายไฟตรง ผลของการใช้เวกเตอร์กลุ่ม c ในโหมคที่ 1 จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของระดับแรงดันนิวทรัลในทางเพิ่มขึ้น และเมื่อแรงดันนิวทรัลมีค่าถึงค่าขีดจำกัดบนของแถบฮิสเตอร์ซิสก็จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโหมคเป็นโหมคที่ 2 ที่ใช้เวกเตอร์กลุ่ม d แรงดันนิวทรัลก็จะเปลี่ยนแปลงในทางลดลง

รูปที่ 3.23 (ก) เป็นผลที่ได้ในกรณีที่ใช้เวกเตอร์อ้างอิงมีขนาดใหญ่ (325 V) ทำให้ต้องใช้เวกเตอร์กลุ่ม a กลุ่ม b กลุ่ม c และกลุ่ม d ซึ่งเป็นการทำงานแบบสามระดับดังสังเกตเห็นจากรูปคลื่นแรงดัน ในรูปที่ 3.23 (ข) เราจะเห็นได้ว่าระบบยังคงสามารถควบคุมแรงดันนิวทรัลได้ดีเช่นเดิมโดยอาศัยการสลับโหมคการทำงาน เมื่อระดับแรงดันนิวทรัลมีค่าถึงค่าจำกัดบนและต่ำอย่างไรก็ตาม ในกรณีนี้ ในแต่ละโหมคการทำงานจะมีผลจากการใช้เวกเตอร์กลุ่ม b ที่มีต่อระดับแรงดันนิวทรัลรวมอยู่ด้วย จึงเกิดเป็นระลอกคลื่นปะปนอยู่ในแรงดันนิวทรัล แต่มีค่าผลรวมของการเปลี่ยนแปลงของแรงดันนิวทรัลเท่ากับ 0 ตามคำอธิบายที่แสดงไว้ในหัวข้อก่อน





รูปที่ 3.23 สัญญาณที่ได้เมื่อเวกเตอร์อ้างอิงมีค่าเท่ากับ 325 V

โดยสรุปในบทนี้ เราได้กล่าวถึง หลักการทำงานของวิธีการปรับความกว้างพัลส์อย่างง่าย สำหรับอินเวอร์เตอร์สามระดับและผลที่ได้จากการจำลองระบบด้วยซอฟต์แวร์ อันเป็นแนวทางที่จะใช้อธิบายผลการทดสอบในบทต่อไป