บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันการใช้โหลดประเภทที่ไม่เป็นเชิงเส้นจะเป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกในโรงงานอุตสาหกรรมและในอาคารพาณิชย์นับวันมีการใช้โหลดดังกล่าวเพิ่มมากขึ้น ผลทำให้รูปคลื่นของกระแสเพี้ยนไปจากรูปไซด์ ซึ่งจะส่งผลกระทบให้อุปกรณ์มีการทำงานผิดพลาด หรืออาจเกิดการเสียหายได้

ปัญหาฮาร์มอนิกทำให้เกิดผลกระทบต่ออุปกรณ์ในระบบไฟฟ้า ทำให้อุปกรณ์ในระบบมีการทำงานผิดพลาดเนื่องจากผลของความผิดเพี้ยนค่าแรงดันและกระแสฮาร์มอนิกทั้งขนาดและรูปคลื่นสัญญาณ ทำให้อุปกรณ์ในระบบมีอายุการใช้งานน้อยลงหรือเกิดการชำรุดเสียหาย โดยเกิดจากค่า rms ของแรงดันหรือกระแสสูงขึ้น หรือมีการขยายขนาดของแรงดันและกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดจากฮาร์มอนิกรีโซแนนซ์

จากปัญหาฮาร์มอนิกที่ทำให้เกิดผลกระทบต่ออุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าจะใช้การทำงานของวงจรกรองกำลังชนิดแอคทีฟในการแก้ปัญหาคลื่นของกระแสที่เพี้ยนไปจากรูปไซน์

1.2 การทบทวนวรรณกรรมเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

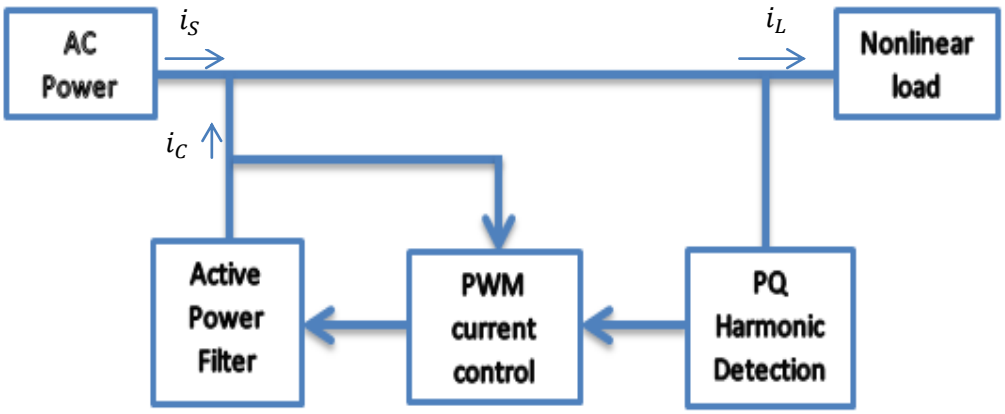
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กองพล อารีรักษ์ (2553) งานวิจัยนี้นำเสนอการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอคทีฟ การตรวจจับอาร์มอนิกสำหรับใช้งานร่วมกับวงจรกรองกำลังแอคทีฟใช้วิธีดีคิวเอฟ (DQF) ที่ได้รับการเปรียบเทียบสมรรถนะการตรวจจับกับวิธีกรอบอ้างอิงซิงโครนัส (SRF) ตัวควบคุมการฉีดกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอคทีฟใช้ตัวควบคุมพีไอที่ทำงานร่วมกับเทคนิคการสวิตช์แบบพีดับเบิลยูเอ็มในการควบคุมการทำงานของไอจีบีที การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับงานวิจัยนี้ใช้วิธีทางปัญญาประดิษฐ์ ที่เรียกว่า วิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว (ATS) ทั้งนี้เพื่อต้องการให้ผลการกำจัดฮาร์มอนิกสามารถกำจัดฮาร์มอนิกได้มากที่สุด โดยดัชนีชี้วัดจะดูที่ค่า % THD ที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักจะต้องมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ พบว่า ปริมาณฮาร์มอนิกของกระแสไฟฟ้าทางด้านแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าภายหลัง

การชดเชยมีค่าลดลง และมีค่า % THD อยู่ในกรอบมาตรฐาน IEEE std.519-1992 นอกจากนี้การควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอคทีฟใช้ตัวควบคุมแบบพีไอทีใช้งานร่วมกับตรวจจับฮาร์มอนิกวิธีดีคิวเอฟ

1.3 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

1. เพื่อสร้างแรงดันควบคุมด้วยกระแสสำหรับตัวกรองแบบแอคทีฟด้วยวงจรอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสแบบฟูลบริดจ์
2. เพื่อเป็นวงจรต้นแบบสำหรับการพัฒนาตัวกรองกำลังชนิดแอคทีฟด้วยเทคนิคพีดับเบิลยูเอ็ม
3. เพื่อทำการออกแบบและสร้างวงจรอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสแบบฟูลบริดจ์
4. เพื่อการศึกษาหลักการทำงานของตัวกรองกำลังชนิดแอคทีฟ

1.4 โครงสร้างของโครงงาน



ภาพที่ 1.1 โครงสร้างรวมของเครื่องกรองกำลังแอคทีฟชนิด 1 เฟส

กำหนดให้

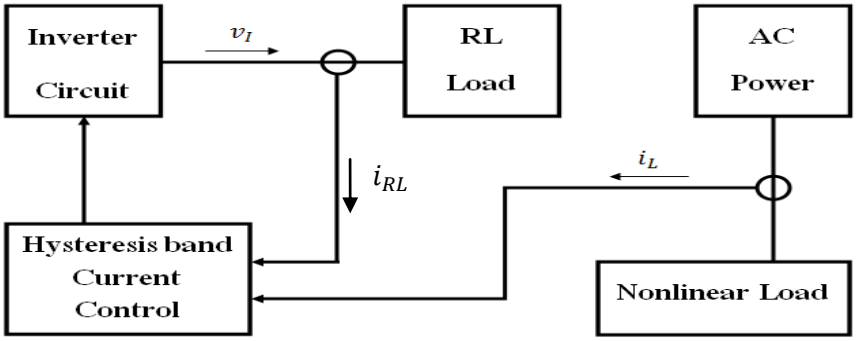
กระแสโหลดชนิดไม่เป็นเชิงเส้น (i_L)

กระแสไฟฟ้าชดเชย (i_C)

กระแสที่จ่ายออกมาจากหม้อแปลงหรือแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า (i_S)

กระแสที่โหลดชนิด RL (i_{RL})

จากภาพที่ 1.1 โครงสร้างรวมของเครื่องกรองกำลังแอคทีฟชนิด 1 เฟส ในโครงงานนี้จะสร้างในส่วนการสร้างแรงดันควบคุมด้วยกระแสสำหรับตัวกรองแบบแอคทีฟด้วยวงจรอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสแบบฟูลบริดจ์



ภาพที่ 1.2 โครงสร้างอินเวอร์เตอร์จ่ายแรงดันควบคุมด้วยกระแส

กำหนดให้

กระแสโหลด (i_L)

แรงดันควบคุมด้วยกระแส (v_I)

1.5 ขอบเขตของโครงงาน

1. พิกัดกระแสของเครื่องอินเวอร์เตอร์จ่ายแรงดันควบคุมด้วยกระแสขนาด 10 แอมแปร์ โดยใช้แรงดันกระแสตรง 460 Vdc

2. อินเวอร์เตอร์จ่ายแรงดันควบคุมด้วยกระแสชนิดหนึ่งเฟส

1.6 ประโยชน์ของโครงงาน

1. สามารถสร้างแรงดันควบคุมด้วยกระแสสำหรับตัวกรองแบบแอคทีฟด้วยวงจรอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสแบบฟูลบริดจ์เพื่อพัฒนาตัวกรองกำลังชนิดแอคทีฟ

2. สามารถแสดงให้ผู้ที่สนใจได้เรียนรู้เกี่ยวกับวงจรอินเวอร์เตอร์ฟูลบริดจ์ 1 เฟส

3. ทำให้ทราบถึงปัญหาที่เกิดจากฮาร์มอนิกของโหลดประเภทที่ไม่เป็นเชิงเส้น

4. สามารถแสดงให้ผู้ที่สนใจเกี่ยวกับฮาร์มอนิก ได้เรียนรู้เกี่ยวกับฮาร์มอนิกที่เกิดจากโหลดประเภทที่ไม่เป็นเชิงเส้น

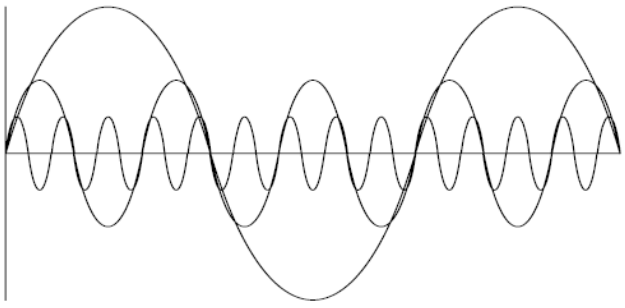
บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับโครงงาน

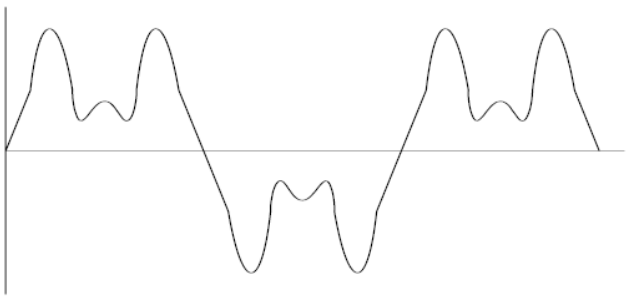
ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง เริ่มต้นโดยความเข้าใจเรื่องฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าและวิธีการกำจัดฮาร์มอนิก โดยจะต้องมีการกล่าวถึงรายละเอียดเพิ่มเติมเช่น อินเวอร์เตอร์และการควบคุมอินเวอร์เตอร์ การใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ การตรวจจับสัญญาณทั้งสัญญาณแรงดันและสัญญาณกระแส

2.1 ฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า [2]

ฮาร์มอนิก(Harmonic) คือส่วนประกอบในรูปสัญญาณคลื่นไซน์ (Sine Wave) ของสัญญาณหรือปริมาณเป็นคาบใด ๆ ซึ่งมีความถี่เป็นจำนวนเต็มเท่าของความถี่มูลฐาน(ในระบบไฟฟ้าของประเทศไทยมีค่าเท่ากับ 50 Hz) เช่น ฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 มีค่าความถี่เป็น 150 Hz ผลของฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นเมื่อรวมกันกับสัญญาณที่ความถี่มูลฐานแล้วทำให้สัญญาณที่เกิดขึ้นมีขนาดเปลี่ยนไป และมีรูปสัญญาณเพี้ยนไปจากสัญญาณคลื่นไซน์ แสดงดังภาพที่ 2.1 และภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.1 แสดงรูปคลื่นที่ความถี่มูลฐานและความถี่ที่เป็นจำนวนเท่าของความถี่มูลฐาน



ภาพที่ 2.2 แสดงรูปคลื่นที่เกิดจากการรวมกันของความถี่มูลฐานและความถี่ที่เป็นจำนวนเท่าของความถี่มูลฐานจากภาพที่ 2.1

สำหรับการอธิบายรูปสัญญาณใด ๆ ที่เป็นสัญญาณรายคาบนิยมใช้อนุกรมฟูเรียร์ที่อยู่ในรูปผลรวมของฟังก์ชันตรีโกณมิติดังอธิบายไว้ในสมการที่ (2.1) เมื่อ $f(t)$ คือ สัญญาณรายคาบใดๆที่ขึ้นอยู่กับเวลา *t*

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega_0 t) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(n\omega_0 t) \quad (2.1)$$

ค่าสัมประสิทธิ์ a_0 , a_n และ b_n ของอนุกรมฟูเรียร์อธิบายได้ดังสมการที่ (2.2) ถึง (2.4) ตามลำดับดังนี้

$$a_0 = \frac{1}{\mathrm{T}} \int f(t)\, dt \quad (2.2)$$

$$a_n = \frac{2}{\mathrm{T}} \int f(t) \cos(n\omega_0 t)\, dt \quad (2.3)$$

$$b_n = \frac{2}{\mathrm{T}} \int f(t) \sin(n\omega_0 t)\, dt \quad (2.4)$$

โดยที่

T	คือคาบของสัญญาณ (s)
n	คือลำดับของฮาร์มอนิก
ω	คือความถี่มูลฐานเชิงมุม (rad/s)

1. ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม [2]

มาตรฐานสากล IEC และ IEEE ใช้ค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม (Total Harmonic Distortion: %THD) เป็นการบ่งบอกปริมาณฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังโดยอาจบ่งบอกเป็นค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวม(Total/Harmonic CurrentDistortion: $\%THD_I$) หรือค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวม (Total Harmonic VoltageDistortion: $\%\ THD_v$) ดังสมการที่ (2.5) และ (2.6) ตามลำดับ ดังนี้

$$\%\mathrm{THD_I} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \mathrm{I}_n^2}}{\mathrm{I_1}} \times 100\% \tag{2.5}$$

$$\%\mathrm{THD_V} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \mathrm{V}_n^2}}{\mathrm{V_1}} \times 100\% \tag{2.6}$$

โดยที่

V_n คือค่า RMS ของแรงดันฮาร์มอนิกลำดับที่ n

I_n คือค่า RMS ของกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ n

V_1 คือค่า RMS ของแรงดันที่ความถี่มูลฐาน

I_1 คือค่า RMS ของกระแสที่ความถี่มูลฐาน

2.ประเภทของฮาร์มอนิก [2]

แรงดันฮาร์มอนิกหรือกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังสามารถแบ่งออกเป็นประเภทต่าง ๆ ได้ดังต่อไปนี้

Harmonic หมายถึง ส่วนประกอบรูปคลื่นไซน์ของรูปคลื่นรายคาบใด ๆ ที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าลงตัวของความถี่มูลฐาน

Interharmonic หมายถึง ส่วนประกอบรูปคลื่นไซน์ของรูปคลื่นรายคาบใด ๆ ที่มีความถี่ไม่เป็นจำนวนเท่าลงตัวของความถี่มูลฐาน มักพบมากในกระแสของเตาหลอมแบบอาร์ก (Arc Furnace)

Characteristic Harmonic หมายถึง ฮาร์มอนิกที่ถูกสร้างขึ้นโดยเครื่องแปลงผันไฟฟ้า ซึ่งมีลำดับฮาร์มอนิกเป็นไปตามสมการที่ (2.7)

$$n = k_p \pm 1$$

(2.7)

โดยที่

n คือลำดับของฮาร์มอนิก

k คือจำนวนเต็มที่มีค่าตั้งแต่ 1,2,3,…

p คือจำนวนพัลส์ของเครื่องแปลงผันไฟฟ้า

Noncharacteristic Harmonic หมายถึง ฮาร์มอนิกที่ถูกสร้างขึ้นโดยเครื่องแปลงผันไฟฟ้า เช่นเดียวกันกับกรณี Characteristic Harmonic แต่มีลำดับฮาร์มอนิกไม่เป็นไปตามสมการที่ (2.7)

Triplen Hamonic หมายถึง ฮาร์มอนิกที่มีลำดับถูกหารด้วย 3 ลงตัว เช่น ฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 6 และ 9 เป็นต้น ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มลำดับศูนย์ (Zero Sequence) ในกรณีที่เป็นระบบไฟฟ้า 3 เฟส 4 สายฮาร์มอนิกกลุ่มนี้จะไหลอยู่ในสายนิวทรอล

3. แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก [2]

- ฮาร์มอนิกเกิดจากระบบไฟฟ้ากำลังต่อเข้ากับโหลดที่มีการทำงานแบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear load) ซึ่งโหลดดังกล่าวสามารถแบ่งออกเป็นประเภทต่าง ๆ ได้ดังนี้

- อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ตามบ้านพัก ซึ่งส่วนใหญ่เป็นชนิด 1 เฟส เช่น เครื่องคอมพิวเตอร์ บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น

- อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง เช่น ในวงจรคอนเวอร์เตอร์ วงจรเรียงกระแส ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ที่มีการปรับความเร็ว (Adjustable-Speed Drive)

- อุปกรณ์ที่มีการทำงานประเภทอาร์ก เช่น เตาหลอมไฟฟ้าแบบอาร์ก เครื่องเชื่อมไฟฟ้าแบบอาร์ก หรือหลอดปล่อยประจุในก๊าซชนิดต่าง ๆ

- อุปกรณ์ที่มีความสัมพันธ์ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear) ของแรงดันและกระแสไฟฟ้า เนื่องจากการอิ่มตัวของแกนเหล็กทางแม่เหล็กไฟฟ้า เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า และเครื่องจักรกลไฟฟ้า เป็นต้น

4. ผลกระทบของฮาร์มอนิก [2]

- การใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีการทำงานแบบไม่เป็นเชิงเส้นดังที่นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 2.1.3 จะส่งผลให้มีฮาร์มอนิกเกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งฮาร์มอนิกเหล่านี้ถือว่าเป็น “มลพิษ” ประเภทหนึ่งทางไฟฟ้า และก่อให้เกิดผลเสียหลายประการ ดังต่อไปนี้

- ทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้ามีการทำงานผิดพลาด ทั้งนี้เนื่องจากแรงดันหรือกระแสไฟฟ้ามีลักษณะรูปสัญญาณผิดเพี้ยนไม่เป็นรูปไซน์

- ทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้ามีอายุการใช้งานสั้นลง หรือเกิดการชำรุดเสียหายเนื่องจากมีค่าแรงดันหรือกระแสไฟฟ้าสูงขึ้นเนื่องจากฮาร์มอนิก

- ผลของกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลอยู่ในสายของระบบจำหน่าย และระบบส่งจ่ายจะทำให้เกิดค่ากำลังงานสูญเสียในสายเพิ่มมากขึ้น และทำให้ประสิทธิภาพการส่งจ่ายลดลง

- ผลของกระแสฮาร์มอนิก Triplen ที่จัดอยู่ในกลุ่มลำดับศูนย์ในระบบ 3 เฟส 4 สาย ฮาร์มอนิกกลุ่มนี้จะไหลอยู่ในสายนิวทรอล ซึ่งอาจทำให้สายนิวทรอลเกิดเสียหายได้ถ้าไม่มีการออกแบบรองรับไว้อย่างเหมาะสม

- ผลของกระแสฮาร์มอนิกทำให้กำลังงานสูญเสียสเตรย์ฟลักซ์ (Stray Flux Loss) ของหม้อแปลงมีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพในการทำงานของหม้อแปลงลดลง นอกจากนี้ผลของแรงดันฮาร์มอนิกยังทำให้เกิดกำลังงานสูญเสียกระแสไหลวน (Eddy Current Loss) และกำลังงานสูญเสียฮิสเตอรีซีส (Hysteresis Loss) เพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพในการทำงานของหม้อแปลงลดลงเช่นกัน

- ผลของกระแสฮาร์มอนิกทำให้เกิดความร้อนและเกิดความเครียดไดอิเลกทริก (Dielectricstress) ที่ตัวเก็บประจุ ซึ่งทำให้ตัวเก็บประจุมีอายุการใช้งานสั้นลงและอาจทำให้ฟิวส์ของตัวเก็บประจุขาดง่ายกว่าการใช้งานปกติ นอกจากนี้ผลของแรงดันฮาร์มอนิกยังทำให้เกิดค่ากำลังงานสูญเสียในตัวเก็บประจุ และผลจากสภาวะเรโซแนนซ์ที่ตัวเก็บประจุทำให้เกิดการขยายของกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกให้มีปริมาณสูงขึ้นดังนั้นเพื่อความปลอดภัยในการใช้งานของตัวเก็บประจุให้ทนต่อค่ากระแสและแรงดันฮาร์มอนิก ตัวเก็บประจุที่ออกแบบจากผู้ผลิตควรอยู่ในกรอบตามมาตรฐานของ IEEE std. 18-1992

- ผลของกระแสฮาร์มอนิกทำให้เกิดความร้อนในตัวฟิวส์เพิ่มขึ้น จึงทำให้คุณลักษณะของเวลาและกระแส (Time-Current Characteristic) ของฟิวส์เปลี่ยนไป ส่งผลให้ฟิวส์ทำงานผิดพลาดจากสภาวะปกติ

- ผลของกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกทำให้การทำงานของรีเลย์ชนิดต่าง ๆ ผิดพลาดไปจากเดิม เช่น รีเลย์มีการทำงานช้าลง หรือทำงานด้วยค่าการเริ่มตอบสนอง (Pickup Values) ที่สูงซึ่ง

โดยปกติรีเลย์จะทำงานอย่างรวดเร็วและทำงานด้วยค่าเริ่มตอบสนองที่ต่ำ นอกจากนี้ในกรณีที่มีกระแสฮาร์มอนิก (Triplen) ในปริมาณมากพออาจทำให้กราวด์รีเลย์ทำงานผิดพลาด และในกรณีของรีเลย์ระยะทาง (Distance Relay) อาจทำงานผิดพลาดเนื่องจากผลของกระแสฮาร์มอนิกที่ทำให้อิมพีแดนซ์มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งต่างจากค่าอิมพีแดนซ์ที่ทำการตั้งไว้ที่ความถี่มูลฐานนอกจากนี้ในกรณีของรีเลย์สถิตแบบต่ำ(Static Under Frequency Relay) อาจมีความไวเร็วกว่าปกติซึ่งทำให้ทำงานผิดพลาดได้ และในกลุ่มรีเลย์กระแสเกิน (Over Current Relay) รีเลย์แรงดันเกิน (Over Voltage) และรีเลย์ชนิดผลต่าง (Differential Relay) อาจทำงานผิดพลาดเนื่องจากฮาร์มอนิก เช่นกัน เพราะว่าการตั้งค่าการทำงานของรีเลย์เหล่านี้พิจารณาเฉพาะองค์ประกอบมูลฐานเท่านั้น

- ผลของกระแสฮาร์มอนิกจะทำให้มีผลกระทบต่อความสามารถในการตัดกระแสของอุปกรณ์สวิตช์เกียร์ คือ ทำให้ขนาดอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสเทียบกับเวลา มีค่าสูงในขณะที่กระแสมีค่าเป็นศูนย์เป็นผลทำให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ไม่สามารถตัดกระแสได้เมื่อมีฮาร์มอนิกซึ่งปัญหานี้อาจจะเกิดขึ้นได้กับอุปกรณ์อื่นๆ ที่ใช้ในการตัดกระแสด้วยเช่นกัน

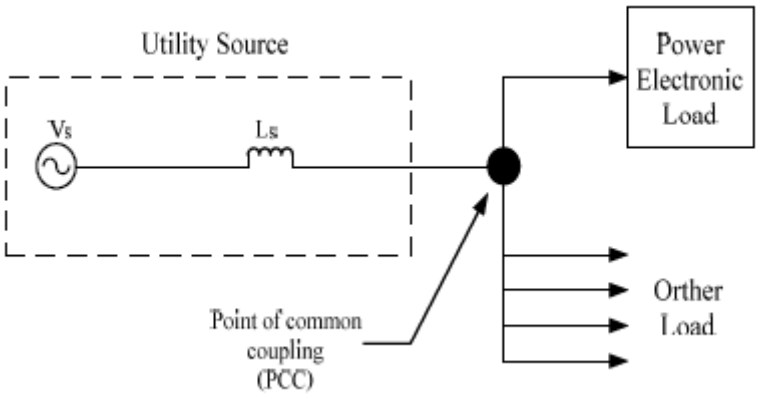
- ผลของกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกทำให้มิเตอร์วัดค่ากำลังงานไฟฟ้า (Watt-Hour meter) ทำงานผิดพลาดได้ ซึ่งโดยปกติการปรับแต่งมิเตอร์จะทำการปรับแต่งไว้ที่ความถี่มูลฐาน

- ผลของกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกทำให้เกิดกำลังงานสูญเสียในเครื่องจักรกลไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เป็นผลทำให้เครื่องจักรกลไฟฟ้าร้อนกว่าปกติ และอาจส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์คือกกิ้ง (Cogging) คือ ไม่สามารถเริ่มเดินเครื่องมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ความเร็วมอเตอร์ต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัสได้ อีกทั้งยังทำให้เกิดการสั่นสะเทือนทางกลของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพและแรงบิด

- ผลของกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกทำให้เกิดสัญญาณรบกวน (Noise) ระบบสื่อสารซึ่งอาจส่งผลให้ข้อมูลในการสื่อสารมีความคลาดเคลื่อนได้

5. มาตรฐานเกี่ยวกับฮาร์มอนิก [2]

มาตรฐานที่บ่งบอกถึงขีดจำกัดความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมสำหรับอ้างอิงในระดับสากลจะใช้การพิจารณาแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า ณ จุดต่อร่วมระหว่างการไฟฟ้าและผู้ใช้ไฟฟ้า (Point of Common Coupling: PCC) ได้แก่ มาตรฐาน IEEE std. 519-1992 ซึ่งเป็นมาตรฐานที่กำหนดค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมในรูปของเปอร์เซ็นต์ ทั้งขีดจำกัดความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิก และขีดจำกัดค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกที่ยอมรับได้ ณ จุด PCC ดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 ไดอะแกรมแสดงจุดต่อร่วม (PCC) ตามมาตรฐาน IEEE std. 519-1992

มาตรฐาน IEEE std. 519-1992 ได้กำหนดค่าความเพี้ยนของแรงดัน และกระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังไว้ดังตารางที่ 2.1 ถึง ตารางที่ 2.4 ดังนี้

ตารางที่ 2.1 ขีดจำกัดค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิก

Bus Voltage at PCC	Individual Voltage Distortion (%)	Total Harmonic Voltage Distortion (THD_v) (%)
< 69 kV	3.0	5.0
69,001 kV- 161 kV	1.5	2.5
> 161 kV	1.0	1.5

จากตารางที่ 2.1 เป็นขีดจำกัดค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกทั้งหมดที่ยอมรับได้ที่จุด PCC และ สังเกตได้ว่าค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกจะแบ่งตามระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบ ตัวอย่างเช่น ระบบไฟฟ้าที่มีแรงดัน ณ จุด PCC ในย่านไม่เกิน 69 kV ค่าความพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกของแต่ละลำดับจะต้องไม่เกิน 3% และค่าความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวม (%THD_v) ของทุกลำดับจะต้องไม่เกิน 5%

ตารางที่ 2.2 ขีดจำกัดค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกลำดับเลขคี่สำหรับระบบจำหน่ายทั่วไป (แรงดัน 120V ถึง 69 kV)

Maximum Harmonic Current Distortion in Percent of I_L (%)						
I_{SC} / I_L	Individual Harmonic Order (Odd Harmonic)					THD_I (%)
	n<11	11<n<17	17<n<23	23<n<35	35< n	
< 20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20<50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50<100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100<1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

ตารางที่ 2.3 ขีดจำกัดค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกลำดับเลขคี่สำหรับระบบส่งจ่ายทั่วไป (แรงดัน 69,001 V ถึง 161kV)

Maximum Harmonic Current Distortion in Percent of I_L (%)						
I_{SC} / I_L	Individual Harmonic Order (Odd Harmonic)					THD_I (%)
	n<11	11<n<17	17<n<23	23<n<35	35< n	
< 20	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
20<50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0
50<100	5.0	2.25	2.0	0.75	0.35	6.0
100<1000	6.0	2.75	2.5	1.0	0.5	7.5
>1000	7.5	3.5	3.0	1.25	0.7	10.0

ตารางที่ 2.4 ขีดจำกัดค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกลำดับเลขคี่สำหรับระบบส่งจ่ายทั่วไป (แรงดัน >161kV)

Maximum Harmonic Current Distortion in Percent of I_L (%)						
I_{SC} / I_L	Individual Harmonic Order (Odd Harmonic)					THD_I (%)
	n<11	11<n<17	17<n<23	23<n<35	35< n	
< 50	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
>50	3.0	1.5	1.15	0.45	0.22	3.75

จากตารางที่ 2.2 ถึง ตารางที่ 2.4 I_{SC} คือ ค่ากระแสลัดวงจรที่จุด PCC I_L คือ ค่าความต้องการกระแสสูงสุด (ที่ความถี่มูลฐาน) และ n คือ ลำดับฮาร์มอนิก นอกจากนี้การพิจารณา

ขีดจำกัดค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกลำดับเลขคู่ (Even Harmonic Limit) ของตารางที่ 2.2 ถึง 2.4 จะมีค่าเท่ากับ 25% ของขีดจำกัดความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกลำดับเลขคี่ (Odd Harmonic Limit) ของแต่ละตาราง และเมื่อพิจารณามาตรฐานจากตารางที่ 2.2 ถึง ตารางที่ 2.4 สังเกตได้ว่าค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกที่ยอมรับได้ ณ จุด PCC จะมีค่าสูงหรือต่ำขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของ I_{SC} / I_L มีค่าเท่าใด ตัวอย่าง เช่น ถ้าระบบจำหน่ายมีอยู่ในช่วง 120 V ถึง 69 kV มีค่ากระแสลัดวงจรที่จุด PCC เท่ากับ 3000 A และมีความต้องการสูงสุด 100 A ดังนั้น ค่าอัตราส่วนของ I_{SC} / I_L คือ 30 ซึ่งจากตารางที่ 2.2 กรอบมาตรฐานค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกที่ลำดับ 3 5 7 และ 9 จะต้องไม่เกิน 7% ในขณะที่ลำดับที่ 11 13 และ 15 จะต้องไม่เกิน 3.5% และค่าความเพี้ยนกระแส 26 ฮาร์มอนิกรวมแบบ $\%THD_I$ (Total Demand Distortion) ต้องมีค่าไม่เกิน 8% โดยค่า $\%THD_I$ ดังกล่าว คำนวณได้จากสมการที่ (2.8) ดังนี้

$$\%\mathrm{THD_I} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \mathrm{I}_n^2}}{\mathrm{I_L}} \times 100\% \qquad (2.8)$$

2.2 วิธีการกำจัดฮาร์มอนิก [1]

ในระบบไฟฟ้าจะมีฮาร์มอนิกอย่างเสมอซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้วจะไม่เกิดปัญหาแต่อย่างใด เฉพาะอุปกรณ์บางอย่างเท่านั้นที่อาจพบปัญหาฮาร์มอนิกจนจำเป็นที่จะต้องแก้ไข ปัจจุบันนี้วิธีแก้ปัญหาฮาร์มอนิกที่นิยมใช้กันอยู่ก็มีไม่กี่แบบ

1. วงจรพาสซีฟฟิลเตอร์

โครงสร้างของวงจรกรองฮาร์มอนิกแบบพาสซีฟ ก็คือ วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรมนั่นเอง โดยจะออกแบบให้ค่าของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุมีความถี่เรโซแนนซ์เท่ากับความถี่ของฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้น ดังนั้นฮาร์มอนิกจะมองเห็นวงจรกรองนี้มีอิมพีแดนซ์ต่ำสุดสำหรับมัน และจะทำให้เกิดกระแสที่ความถี่ฮาร์มอนิกไหลผ่านวงจรกรองนี้เป็นจำนวนมาก ซึ่งกระแสนี้จะมากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้น และนี่ก็เป็นสาเหตุที่ทำให้มันมีโอกาสเกิดกระแสไหลเกินหรือโอเวอร์โหลดได้สูง เพราะถ้าเกิดมีการปรับปรุงหรือเพิ่มเติมระบบของโรงงาน (เช่น การเพิ่มระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟสลับ) จะทำให้กระแสฮาร์มอนิกก็จะเพิ่มขึ้น และทำให้เกิดกระแสไหล

ผ่านวงจรกรองฮาร์มอนิกแบบพาสซีฟ เพิ่มขึ้นมากกว่าที่ได้ออกแบบไว้ได้ หรือพูดง่าย ๆ คือเราจำเป็นต้องรู้รายละเอียดของระบบไฟฟ้ากระแสสลับที่จะต้องไปกรองฮาร์มอนิกเป็นอย่างดี

วงจรกรองแบบพาสซีฟ จะให้หรือกำเนิดค่ากำลังไฟฟ้า (Reactive) จำนวนหนึ่งเสมอ ซึ่งนี่เป็นสิ่งที่ไม่พึงปรารถนา เพราะถ้าหากโหลดที่เราต้องไปชดเชยคือโหลดระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟสลับที่ถือว่าเป็นหัวใจสำคัญของงานอุตสาหกรรม ที่มีค่าตัวประกอบกำลังด้านเข้าที่ดีอยู่แล้ว ในกรณีนี้จะเสี่ยงต่อสิ่งที่เรียกว่าการชดเชยเกิน (Over Compensation)

นอกจากนี้ความสามารถในการกรองของวงจรกรองฮาร์มอนิกแบบพาสซีฟ จะขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์ของวงจรกรองกับอิมพีแดนซ์อื่น ๆ ในระบบ (ลักษณะเดียวกับวงจรแบ่งกระแส) ดังนั้นเราไม่สามารถควบคุมระดับการกรองของมันได้ และความถี่ของการกรองฮาร์มอนิกก็อาจจะเปลี่ยนแปลงได้อันเนื่องมาจากการเสื่อมของอุปกรณ์เมื่อเวลาผ่านไป

2. วงจรแอคทีฟฟิลเตอร์

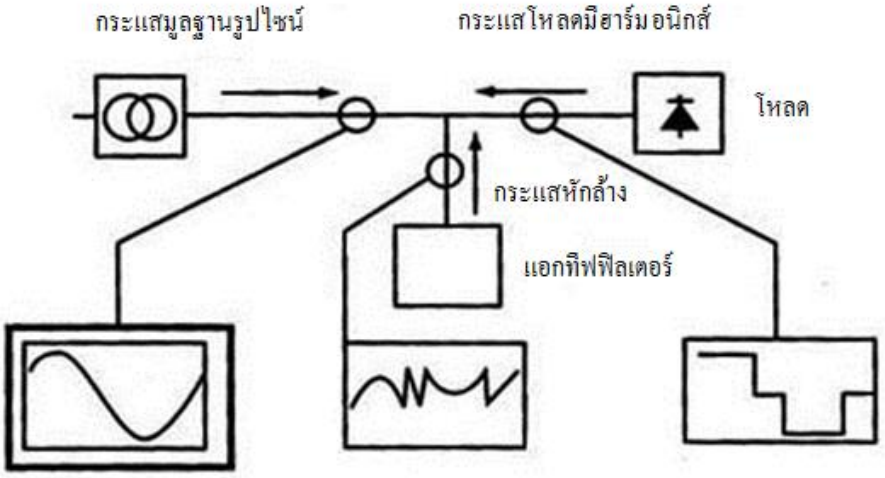
- แอคทีฟฟิลเตอร์ (Active Filter) คือ อุปกรณ์ไฟฟ้าที่สามารถกรองกระแสฮาร์มอนิกออกจากระบบไฟฟ้าได้ โดยมีโครงสร้างหลักประกอบด้วยอุปกรณ์ (Power Electronic) เป็นหลัก และมีการทำงานในระบบ computer control ที่สามารถโปรแกรมสั่งงานได้ อุปกรณ์ (Power Electronic) นี้ ถือเป็นอุปกรณ์แอคทีฟ ส่วนอุปกรณ์พาสซีฟฟิลเตอร์นั้นก็เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่สามารถกรองกระแสฮาร์มอนิกได้เช่นกัน โดยมีโครงสร้างหลัก คือ อุปกรณ์ RLC ที่เป็นอุปกรณ์พาสซีฟ ซึ่งแอคทีฟฟิลเตอร์มีคุณสมบัติดังนี้

- สามารถกรองฮาร์มอนิกออกจากระบบไฟฟ้าได้ทั้งหมดและกรองฮาร์มอนิกได้หลายฮาร์มอนิกในเวลาเดียวกัน

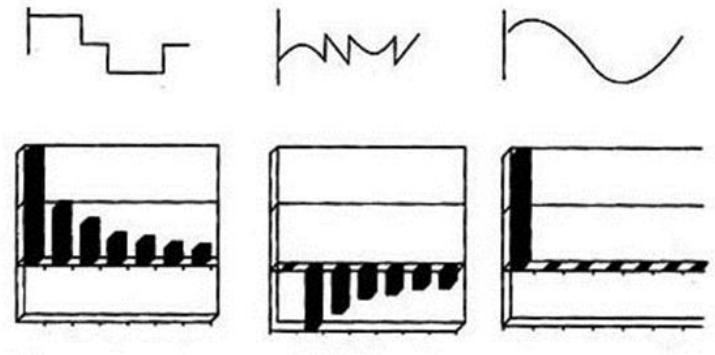
- มีความยืดหยุ่นในการใช้งาน ไม่เกิดโอเวอร์โหลดแม้ฮาร์มอนิกจะมาก

-มีขนาดเล็กและเบา สามารถกรองฮาร์มอนิกได้แม้ในระบบที่มี PF ใกล้ 1.0

3. การทำงานวงจรกรองแอคทีฟเพาเวอร์ฟิลเตอร์



ภาพที่ 2.4 หลักการทำงานของแอคทีฟฟิลเตอร์



ก. ข. ค.

ภาพที่ 2.5 ผลรวมของกระแสฮาร์มอนิกจากอุปกรณ์ไฟฟ้า และกระแสฮาร์มอนิกจากแอคทีฟฟิลเตอร์รวมกันแล้วจะได้รูปคลื่นไซน์ที่สมบูรณ์ปราศจากฮาร์มอนิก

(ก.) กระแสโหลดมีฮามอนิก

(ข.) กระแสหักล้าง

(ค.) ได้กระแสมูลฐานรูปไซน์

อุปกรณ์ไฟฟ้าที่สร้างฮาร์มอนิก โดยทั่วไปแล้วจะประพฤติตัวเสมือนเป็นแหล่งจ่ายฮาร์มอนิกเข้าสู่ระบบไฟฟ้า ซึ่งสามารถตรวจสอบฮาร์มอนิกนี้ได้โดยใช้การตรวจสอบรูปคลื่นว่ามีความผิดเพี้ยนไปจากคลื่นไซน์มากเพียงใด หรือตรวจสอบสเปกตรัมของกระแสว่ามีฮาร์มอนิกปนอยู่มากน้อยเท่าไรและมีฮาร์มอนิกอะไรบ้าง กระแสฮาร์มอนิกที่ถูกจ่ายเข้าระบบไฟฟ้านี้จะไหลไปยังอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ และยังสามารถไหลผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าเข้าไปสู่ระบบไฟฟ้าส่วนกลางได้ จึงทำให้เกิดปัญหาฮาร์มอนิกแก่ผู้ใช้ในบริเวณใกล้เคียง ถือเป็นมลภาวะทางไฟฟ้า

หน้าที่หลักของแอคทีฟเพาเวอร์ฟิลเตอร์ คือ การกำจัดหรือลดปริมาณกระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าเพื่อป้องกันปัญหาจากกระแสและแรงดันฮาร์มอนิก หลักการทำงานของแอคทีฟฟิลเตอร์

- ตรวจวัดระบบไฟฟ้า ว่ามีกระแสฮาร์มอนิกอันดับใดในปริมาณเท่าไร ตามปกติแล้วแอคทีฟฟิลเตอร์ควรจะสามารถตรวจวัดฮาร์มอนิกได้ตั้งแต่ฮาร์มอนิกที่ 2 ถึงฮาร์มอนิกที่ 50

- เปลี่ยนแปลงค่าฮาร์มอนิกที่วัดได้จากอนาลอกเป็นดิจิตอล เพื่อการคำนวณในระบบดิจิตอลโดยใช้ไมโครโปรเซสเซอร์จะมีความแม่นยำ และน่าเชื่อถือ

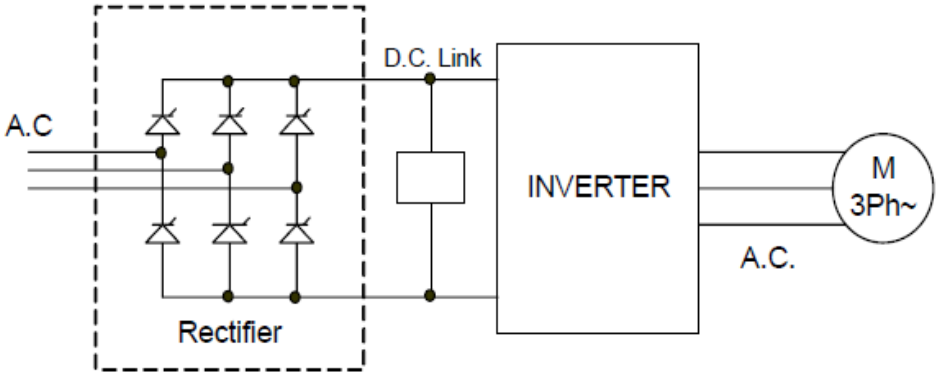
- ส่งสัญญาณควบคุมไปยังอุปกรณ์ (IGBT) เพื่อจ่ายกระแสฮาร์มอนิกที่มีในระบบไฟฟ้าแต่มีทิศทางตรงข้ามกันเพื่อหักล้างกระแสฮาร์มอนิกนั้น

สรุปสั้นๆ ได้ว่าแอคทีฟฟิลเตอร์จะตรวจสอบกระแสฮาร์มอนิกที่มีอยู่ในระบบไฟฟ้าและจ่ายกระแสฮาร์มอนิกที่เท่ากัน แต่มีทิศทางตรงกันข้ามเพื่อหักล้างฮาร์มอนิกทั้งหมดจนเหลือแต่กระแส 50 Hz

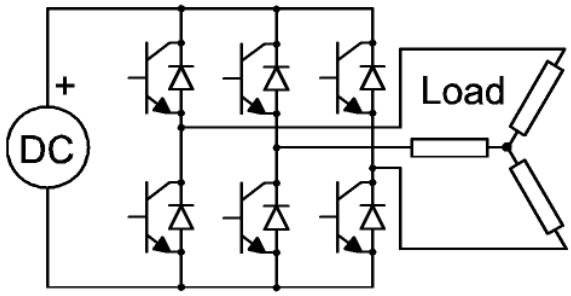
2.3 อินเวอร์เตอร์ [5]

ปัจจุบันอินเวอร์เตอร์ได้พัฒนาอย่างรวดเร็วและมีการใช้งานอย่างแพร่หลาย ในภาคอุตสาหกรรมโดยเฉพาะในงานควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้า เนื่องจากอินเวอร์เตอร์สามารถที่จะใช้ในการควบคุมมอเตอร์ให้ได้ความเร็วรอบแรงบิดตามต้องการและมีประสิทธิภาพสูง อินเวอร์เตอร์ (Inverter) หมายถึงอุปกรณ์อิเล็กทรอนิคส์ที่ใช้สำหรับแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ โดยแบ่งออกเป็นสองชนิด คือ ชนิดที่ใช้เป็นแหล่งจ่ายกำลัง (Power Supplies) ซึ่งไม่มีการเคลื่อนที่ เช่น ระบบป้องกันกำลังไฟฟ้าขาดช่วง (Uninterruptible Power Supplies) และอีกประเภทหนึ่งคือชนิดที่ใช้กับโหลดที่มีการเคลื่อนที่ เช่น มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นต้น จุดประสงค์ที่เหมือนของทั้งสองชนิดคือต้องการให้ได้แรงดันไฟฟ้าด้านออกที่สามารถควบคุมได้ทั้งขนาด และความถี่

บล็อกไดอะแกรมของอินเวอร์เตอร์โดยทั่วไป (อินเวอร์เตอร์สามเฟส) แสดงดังภาพที่ 2.6 และภาพที่ 2.7 โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์



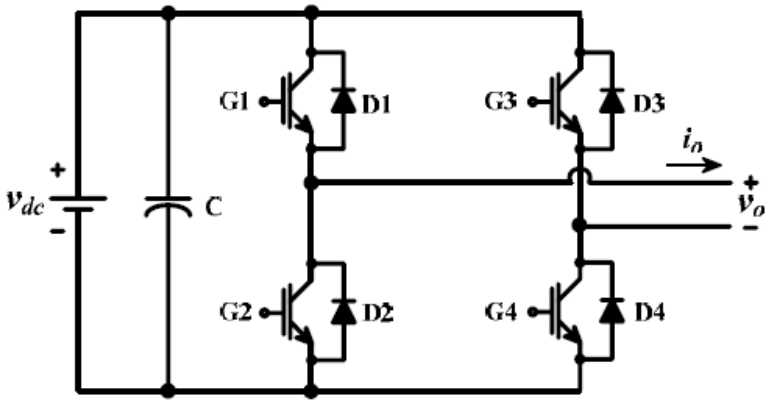
ภาพที่ 2.6 บล็อกไดอะแกรมของอินเวอร์เตอร์



ภาพที่ 2.7 โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์

1. อินเวอร์เตอร์ 1 เฟส

อินเวอร์เตอร์เป็นวงจรแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ จากภาพที่ 2.8 แสดงวงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ จากแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทางด้านอินพุตอินเวอร์เตอร์ถูกเปลี่ยนเป็นไฟฟ้ากระแสสลับโดยการควบคุมสวิทซ์ทั้ง 4 ตัว เพื่อกำหนดทิศทางของกระแสที่ไหลไปยังโหลด โดยวิธีการควบคุมมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี เช่น เทคนิค PWM แบบต่างๆ และการควบคุมกระแสฮีสเตอรีซีส



ภาพที่ 2.8 อินเวอร์เตอร์ 1 เฟส แบบฟูลบริดจ์

2. วงจรเรียงกระแส (Rectifier Circuit)

วงจรเรียงกระแสจะทำหน้าที่แปลงผันสัญญาณจากไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง วงจรกำลังจะประกอบด้วย ไดโอด 4 ตัวกรณีที่อินพุตเป็นแบบเฟสเดียว และไดโอด 6 ตัว กรณีที่อินพุตเป็นแบบสามเฟส

3. วงจรเชื่อมโยงทางดีซี (DC Link)

วงจรเชื่อมโยงทางดีซี คือ วงจรที่เชื่อมต่อระหว่างวงจรเรียงกระแสและวงจรอินเวอร์เตอร์ ซึ่งจะประกอบไปด้วยคาปาซิเตอร์ ทำหน้าที่กรองแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากวงจรเรียงกระแสให้เรียบขึ้น และทำหน้าที่เก็บประจุไฟฟ้า

5. วงจรอินเวอร์เตอร์ (Inverter Circuit)

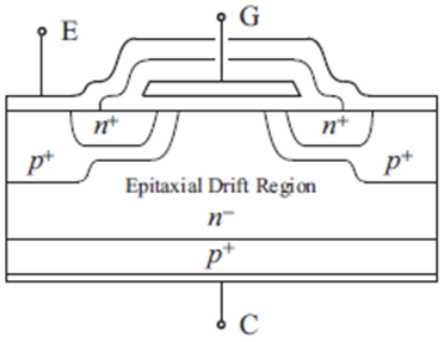
วงจรอินเวอร์เตอร์ คือ ส่วนที่ทำหน้าที่แปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ที่ผ่านการกรองจากวงจรเชื่อมโยงทางดีซีเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ วงจรกำลังจะประกอบด้วยอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ (ในปัจจุบันจะนิยมใช้ IGBT) ทำหน้าที่ตัดต่อกระแสไฟฟ้าเพื่อแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับโดยใช้เทคนิค PWM (Pulse Width Modulations)

การแปลงกระแสสลับเป็นกระแสตรงและแปลงจากกระแสตรงเป็นกระแสสลับอีกครั้ง คือ การแปลงกระแสสลับโดยตรงนั้นความถี่ทางด้านขาออกจะไม่เกินความถี่ทางด้านขาเข้า ทำให้ไม่สามารถควบคุมความเร็วของมอเตอร์ให้มากกว่าความเร็วพิกัดได้แต่การการเปลี่ยนจากกระแสสลับเป็นกระแสตรงและแปลงกลับมาเป็นกระแสสลับอีกครั้ง จะทำให้อินเวอร์เตอร์สามารถ

สร้างความถี่ได้สูงกว่าความถี่ทางด้านขาเข้า ดังนั้นจึงสามารถที่จะปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ให้มากกว่าความเร็วพิกัดได้

6. ไอจีบีที (Insulated Gate Bipolar Transistors,IGBT) [7]

ไอจีบีที(IGBT: Isolated-Gate Bipolar Transistor) หรือเรียกอย่างเต็มว่า ทรานซิสเตอร์สองขั้วเกตแยก เป็นอุปกรณ์สำหรับการสวิตช์ชนิดหนึ่ง ที่สามารถนำกระแสไฟฟ้าได้เป็นปริมาณสูง มีความเร็วสูงในการสวิตช์ในขณะที่มีค่าความต้านทานขาเข้าสูง ไอจีบีที นับได้ว่าเป็นทรานซิสเตอร์ชนิดหนึ่ง ที่นำกระแสไฟฟ้าได้โดยอาศัยพาหะประจุทั้งสองชนิด ได้แก่ พาหะประจุบวก และ พาหะประจุลบ เช่นเดียวกับกรณีของทรานซิสเตอร์รอยต่อสองขั้ว หรือ บีเจที (BJT) แต่การควบคุมกระแสไฟฟ้านั้น อาศัยสนามไฟฟ้าที่ขั้วเกตที่แยกส่วนออกมาจากตัวทรานซิสเตอร์ ที่คั่นด้วยฉนวนไฟฟ้า (หรือ ออกไซด์ของสารกึ่งตัวนำ) ซึ่งมีลักษณะสมบัติคล้ายกับเป็น มอสเฟต (MOSFET) อีกตัวหนึ่งต่อวงจรร่วมอยู่กับบีเจทีสองตัว ดังแสดงตัวอย่างโครงสร้างของไอจีบีทีแบบหนึ่ง ในภาพที่ 2.9 ซึ่งเป็น ไอจีบีทีช่องผ่านกระแสแบบ-เอ็น (N-Channel IGBT)

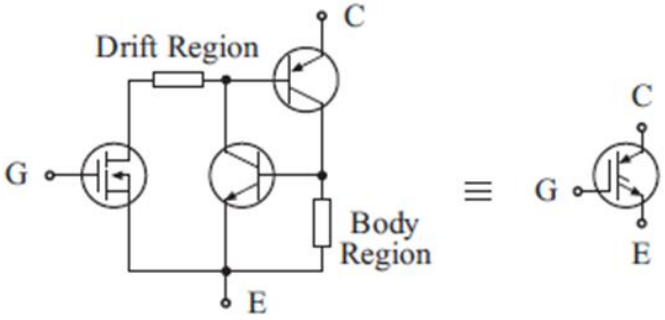


ภาพที่ 2.9 โครงสร้างของไอจีบีที

ลักษณะโครงสร้างของไอจีบีทีโดยทั่วไปนั้นคล้ายกับเอสซีอาร์ หรือไดโอดสี่ชั้น กล่าวคือประกอบด้วยโครงสร้างสี่ชั้นของสารกึ่งตัวนำแบบ-เอ็น และแบบ-พี สลับกัน แต่ขั้วเกตที่ใช้ทำหน้าที่ควบคุมการ เปิด / ปิด วงจรนั้น อาศัยโครงสร้างของมอสเฟตทำหน้าที่จ่ายกระแสจุดชนวนให้แก่ทรานซิสเตอร์ ดังสามารถแสดงวงจรสมมูลและสัญลักษณ์ของไอจีบีทีได้ในภาพที่ 2.10

ทั้งนี้ขั้วที่ใช้สำหรับการผ่านกระแสไฟฟ้าหลัก เรียกว่า ขั้วคอลเล็กเตอร์ แทนด้วยอักษรย่อ C หรือบางครั้งเรียกว่า ขั้วเดรน กับอีกขั้วหนึ่ง เรียกว่า ขั้วอิมิตเตอร์ แทนด้วยอักษรย่อ E หรือ

บางครั้งเรียกว่า ขั้วซอร์ส ส่วนขั้วที่ใช้สำหรับควบคุมการ เปิด / ปิด ตัวอุปกรณ์ เรียกว่า ขั้วเกต แทนด้วยอักษรย่อ G โดยขั้วคอลเล็กเตอร์ของบีเจทีทั้งสองตัว ต่างก็ต่อเข้ากับขั้วเบสของบีเจทีอีกตัวหนึ่ง ซึ่งเป็นลักษณะของวงรอบการป้อนกลับแบบบวก (Positive or Regenerative Feedback Loop) จึงทำให้ไอจีบีทีนำกระแสไฟฟ้าได้อย่างรวดเร็ว เมื่อได้รับการจุดชนวนจากมอสเฟต ดังนั้น ไอจีบีที จึงเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ผสมผสานลักษณะสมบัติเด่นของบีเจที ที่สามารถนำกระแสไฟฟ้าได้สูง มีแรงดันตกคร่อมต่ำในระหว่างการนำกระแสไฟฟ้า และมีความเร็วสูงในการสวิตช์ ประกอบกับลักษณะสมบัติเด่นของ มอสเฟต ที่มีค่าความต้านทานขาเข้าสูงมาก



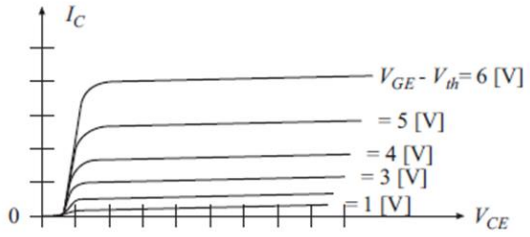
ภาพที่ 2.10 วงจรสมมูลของไอจีบีที

ในขณะที่ไอจีบีทีอยู่ในสถานะวงจรปิดนั้นจะมีระดับแรงดันตกคร่อมระหว่าง ขั้วคอลเล็กเตอร์ (หรือขั้วเดรน) กับขั้วอิมิตเตอร์ (หรือขั้วซอร์ส) ค่อนข้างต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับมอสเฟตที่มีค่าความต้านทานของช่องผ่านกระแสค่อนข้างสูง จึงทำให้ ไอจีบีที สามารถผ่านกระแสไฟฟ้าได้ด้วยปริมาณสูง และด้วยความไวในการสวิตช์ที่สูงกว่าอุปกรณ์ชนิดอื่น จึงนิยมใช้ไอจีบีทีในงานควบคุมกำลังไฟฟ้าขนาดกลางและขนาดสูง เช่น แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์ (Switching Power Supply) วงจรควบคุมมอเตอร์ต้นกำลัง หรือใช้ในการขับขดลวดเหนี่ยวนำในระบบทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำ (Induction Heating) เป็นต้น

อย่างไรก็ดี ไอจีบีที อาจประสบกับปัญหาในการสั่งหยุดนำกระแสไฟฟ้า (Turn-off) ไม่ได้ เนื่องจากเกิดสภาวะลงกลอน (Latch Up) คล้ายกับกรณีของเอสซีอาร์ ที่ต้องใช้วิธีการถอนกระแสเท่านั้น จึงจะทำให้หยุดนำกระแสไฟฟ้าได้ ทั้งนี้ ในการออกแบบโครงสร้างของไอจีบีทีจะต้องคำนึงถึงค่าความต้านทานระหว่างขั้วเบสกับขั้วอิมิเตอร์ของทรานซิสเตอร์ เอ็น-พี-เอ็น (Body Resistance) ที่เหมาะสมและต่ำเพียงพอที่จะไม่ทำให้เกิดสภาวะลงกลอน ดังสามารถแสดงตัวอย่างกราฟลักษณะสมบัติเฉพาะช่วงการไบอัสแบบตามของไอจีบีทีได้ในภาพที่ 2.11

ในขณะที่ลัดวงจรขั้วเกตเข้ากับขั้วอิมิตเตอร์อยู่ แล้วไบอัสแบบตามระหว่างขั้วคอลเล็กเตอร์กับขั้วอิมิตเตอร์ไอจีบีทีจะไม่มีการนำกระแสไฟฟ้า เนื่องจากอยู่ในสภาวะปิดกั้นแบบ

ตาม (Forward Blocking) และเมื่อต้องการให้ไอจีบีทีนำกระแสไฟฟ้า ก็สามารถทำได้ โดยการเปิดวงจรขั้วเกตออกจากอิมิตเตอร์ แล้วป้อนแรงดันบวกเข้าที่ขั้วเกต ในระดับสูงเพียงพอที่จะก่อให้เกิดช่องผ่านกระแสแบบ-เอ็น ที่ตัวมอสเฟต แล้วกระแสไฟฟ้าก็จะเริ่มไหลผ่านตัวมอสเฟต โดยการรับกระแสไฟฟ้ามาจากตัวต้านทานในย่านดริฟต์ (Drift Region Resistance) ซึ่งเป็นกระแสไฟฟ้าที่ผ่านมาจากขั้วเบสและขั้วอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ พี-เอ็น-พี ตามลำดับ ทรานซิสเตอร์ พี-เอ็น-พี จึงเริ่มนำกระแสไฟฟ้า ด้วยอัตราขยายกระแส β เท่า ไปปรากฏเป็นกระแสคอลเล็กเตอร์ และผ่านต่อไปยังขั้วเบสของทรานซิสเตอร์ เอ็น-พี-เอ็น เกิดการขยายกระแสอย่างเป็นวงรอบการป้อนกลับแบบบวก จนไอจีบีทีอยู่ในสภาวะนำกระแสแบบตาม (Forward Conducting) สำหรับการสั่งให้ไอจีบีทีหยุดนำกระแสไฟฟ้า ก็สามารถทำได้โดยการลัดวงจรขั้วเกตเข้ากับขั้วอิมิตเตอร์



ภาพที่ 2.1 กราฟลักษณะสมบัติของไอจีบีที

โดยทั่วไปแล้ว ลักษณะสมบัติในการสวิตช์ของไอจีบีที คล้ายกันมากกับกรณีของมอสเฟตกำลัง (Power MOSFET) แต่ไอจีบีทีอาจประสบกับปัญหากระแสที่หยุดไหลช้า เนื่องจากประจุสะสม (Stored Charge) ในบริเวณดริฟต์ (Drift Region) ซึ่งในบางครั้ง อาจต้องการแรงดันไฟฟ้าลบป้อนเข้าที่ขั้วเกต เพื่อสั่งให้ไอจีบีทีหยุดนำกระแสไฟฟ้าได้เร็วขึ้น ทั้งนี้ให้พิจารณาจากเอกสารข้อมูล (Data Sheet) ของไอจีบีทีแต่ละหมายเลขประกอบการออกแบบ เพื่อให้วงจรสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.4 การควบคุมอินเวอร์เตอร์ [6]

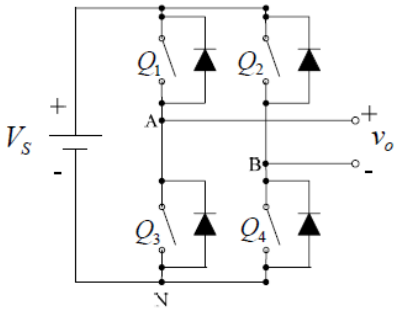
เป็นการกำหนดรูปแบบการควบคุม คือ การกำหนดรูปแบบการ เปิด / ปิด อินเวอร์เตอร์ อินเวอร์เตอร์แต่ละประเภทแตกต่างกันในการเชื่อมโยง DC และแตกต่างกันที่มีความจำเป็นต้องใช้

freewheeling diodes หรือไม่หรือต่างกันที่ถูกสร้างมาให้ทำงานใน Square-Wave หรือ Pulse-Width Modulation (PWM) Mode อย่างใดอย่างหนึ่ง โหมด Square-wave mode มีความเรียบง่าย ในขณะที่ PWM สามารถดำเนินการได้หลายวิธีและสร้างรูปคลื่นคุณภาพสูงกว่า

1. การควบคุมอินเวอร์เตอร์แบบพีดับเบิลยูเอ็ม (PWM)

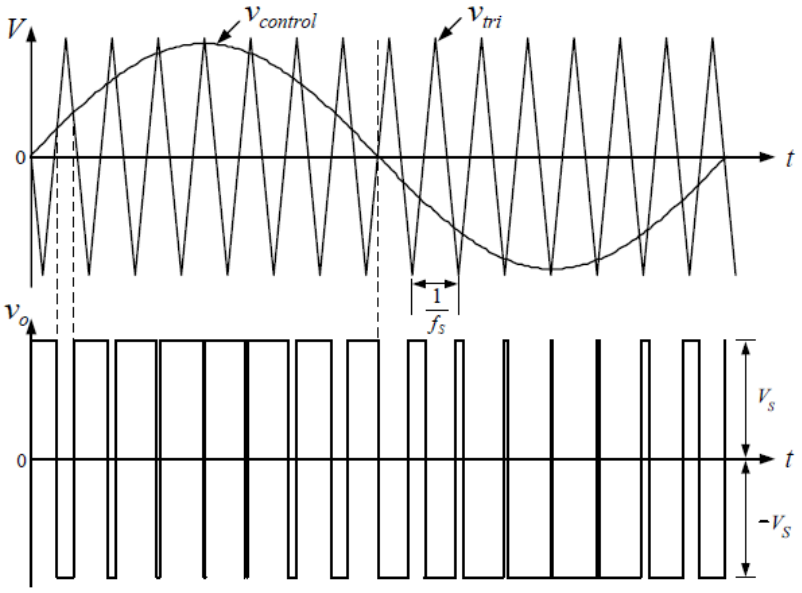
การเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ หรือที่นิยมเรียกกันว่าอินเวอร์เตอร์ (Inverter) มีการนำไปใช้งานกันหลากหลาย เช่น ใช้เป็นระบบจ่ายไฟสำรอง ใช้ในการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ หรือนำไปใช้ในรถยนต์เวลาเดินทางไปยังที่ๆ ไม่มีไฟฟ้าใช้ ในวงจรอินเวอร์เตอร์ทั่วไปที่ต้องการสัญญาณแรงดันเป็นรูปคลื่นไซน์ วิธีการควบคุมการสวิตช์แบบ พีดับเบิลยูเอ็มมักนิยมใช้กัน โดยใช้วิธีการสร้างสัญญาณควบคุมรูปไซน์ นำมาเปรียบเทียบกับรูปคลื่นสามเหลี่ยม วิธีนี้เป็นวิธีที่ง่ายในการสร้างแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ การสวิตช์แบบพีดับเบิลยูเอ็มแบ่งออกเป็น 2 แบบคือ แบบไบโพลาร์ (Bipolar Voltage Switching) และแบบยูนิโพลาร์ (Unipolar Voltage Switching)

การสวิตช์แบบไบโพลาร์ การสวิตช์แรงดันแบบไบโพลาร์ คือ การควบคุมให้สวิตช์แบบฟูลบริดจ์ทำงานพร้อมกันเป็นคู่ดังภาพที่ 2.12 การทำงานของสวิตช์ Q_1 ทำงานร่วมกับ Q_4 และ Q_2 ทำงานร่วมกับ Q_3 เมื่อสัญญาณควบคุมรูปไซน์มีค่ามากกว่าสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยม สวิตช์ Q_1 และ Q_4 จะนำกระแส ขนาดแรงดันเอาต์พุต V_0 มีค่าเท่ากับ V_S แต่ถ้าสัญญาณควบคุมรูปไซน์มีค่าน้อยกว่าสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยม สวิตช์ Q_2 และ Q_3 จะนำกระแส ขนาดแรงดันเอาต์พุต V_0 มีค่าเท่ากับ V_S ภาพการสวิตช์แรงดันแบบไบโพลาร์แสดงในภาพที่ 2.13



ภาพที่ 2.12 วงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์

สิ่งที่ระบุว่าเป็นการสวิตช์แบบไบโพลาร์ คือ มีการสวิตช์ของแรงดันระหว่างสาย (V_0 หรือ V_{AB}) ระหว่างขั้วหรือบัสบวกกับลบ ความถี่ของสัญญาณพัลส์ที่โหลดเท่ากับความถี่ของสัญญาณสามเหลี่ยม



ภาพที่ 2.13 การสวิตช์แรงดันแบบไบโพลาร์

การสวิตช์แบบยูนิโพลาร์ ข้อแตกต่างระหว่างการสวิตช์แรงดันไฟฟ้าแบบไบโพลาร์กับแบบยูนิโพลาร์ คือ ในแบบยูนิโพลาร์การควบคุมสวิตช์ในกิ่ง A กับกิ่ง B (ภาพที่ 2.12) จะแยกสัญญาณควบคุมออกจากกัน คือ สวิตช์ในกิ่ง A ถูกควบคุมจากสัญญาณ $V_{control}$ เทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยม V_{tri} ขณะที่สวิตช์ในกิ่ง B ถูกควบคุมจากสัญญาณ $V_{control}$ เทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยม V_{tri} การสวิตช์มีเงื่อนไขดังนี้

เมื่อ > $V_{control}$ V_{tri} สวิตช์ Q_1 นำกระแส $V_{AN} = V_S$

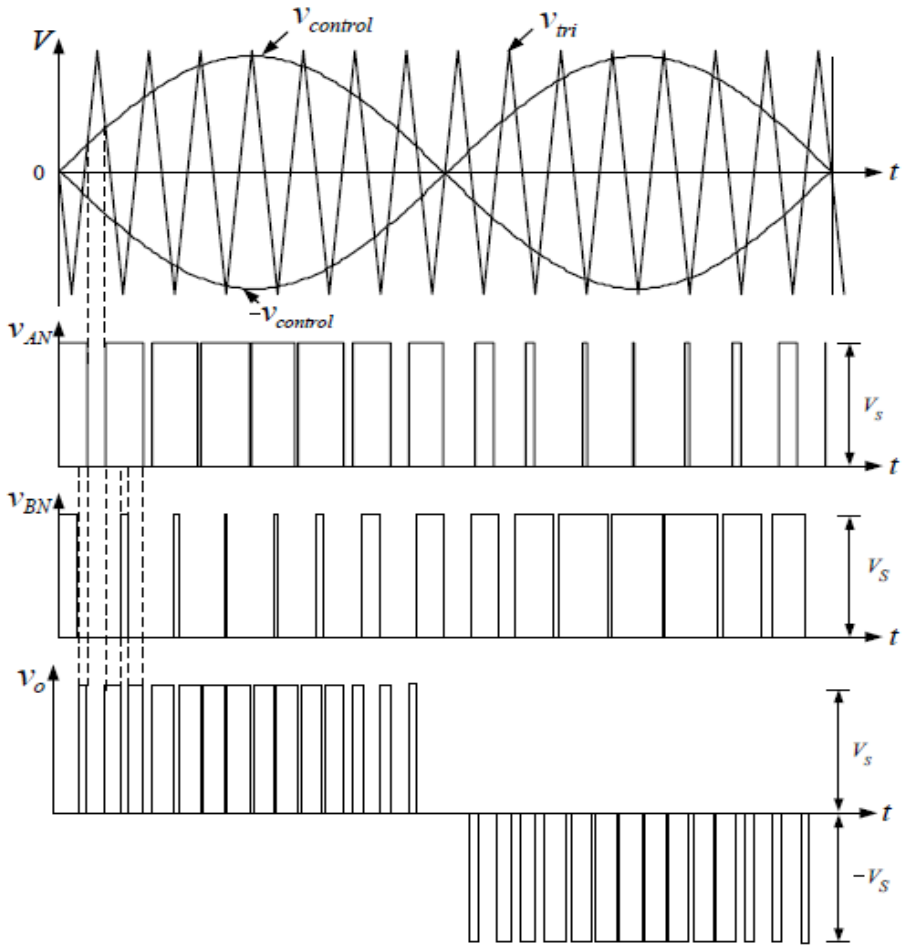
เมื่อ < $V_{control}$ V_{tri} สวิตช์ Q_3 นำกระแส $V_{AN} = 0$

เมื่อ - > $V_{control}$ V_{tri} สวิตช์ Q_2 นำกระแส $V_{BN} = V_S$

เมื่อ - < $V_{control}$ V_{tri} สวิตช์ Q_4 นำกระแส $V_{BN} = 0$

การเปลี่ยนสถานะของแรงดันระหว่างสาย (V_0 หรือ V_{AB}) เป็นการเปลี่ยนแปลงแรงดันอยู่ระหว่างศูนย์ไปยังบวกหรือศูนย์ไปยังลบ ทำให้ไม่เกิดการเปลี่ยนระดับแรงดันจากการสวิตช์สูง เช่นกรณีของไบโพลาร์

จุดเด่นของยูนิโพลาร์ คือ การเกิดความถี่ด้านออกมีความถี่เป็นสองเท่าของความถี่สวิตช์แต่และเฟส ผลของความถี่ที่เพิ่มเป็นสองเท่านี้ ทำให้การออกแบบวงจรกรองความถี่เล็กง่ายและประหยัด สัญญาณการสวิตช์แบบยูนิโพลาร์แสดงในภาพที่ 2.14



ภาพที่ 2.14 การสวิตช์แรงดันแบบยูนิโพลาร์

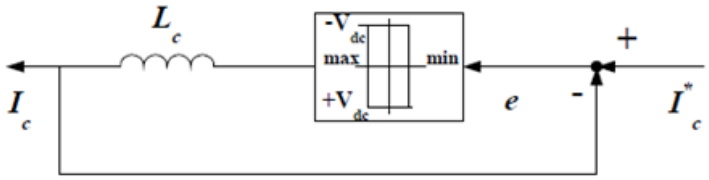
จากการสวิตช์แรงดันแบบไบโพลาร์ และแบบยูนิโพลาร์เมื่อเปรียบเทียบ ข้อดี ข้อเสียของการสวิตช์ทั้งสองแบบ ซึ่งข้อดีของแบบไบโพลาร์ คือ การควบคุมการสวิตช์นั้น สามารถทำได้ง่ายกว่าแบบยูนิโพลาร์ แต่มีข้อเสียตรงการกรองความถี่สูงไม่ดีเท่ากับแบบยูนิโพลาร์ เนื่องจากการ

สวิตช์แบบยูนิโพลาร์มีความถี่ในการสวิตช์สูงกว่าทำให้กรองความถี่ได้ง่ายขึ้น ส่งผลให้อุปกรณ์ที่กรองความถี่ (ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ) มีขนาดเล็กลง

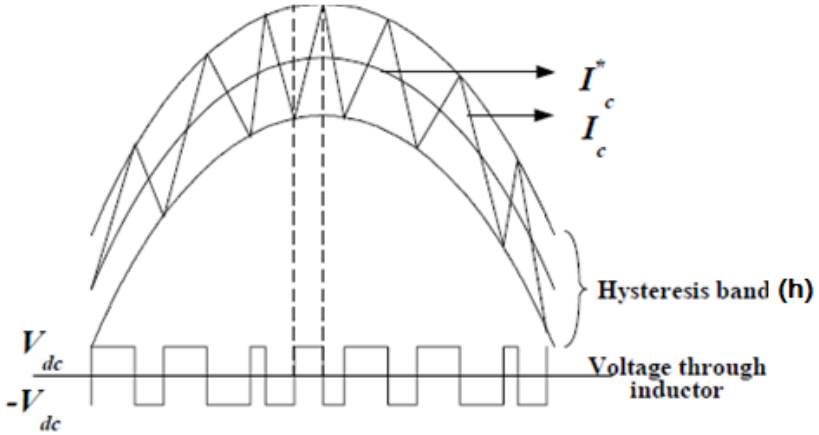
เนื่องจากการสวิตช์โดยใช้ความถี่สูง ส่งผลให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่สวิตช์สูงขึ้นตาม ทำให้ประสิทธิภาพของวงจรต่ำและ อุปกรณ์สวิตช์เสียหายได้ เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว จึงสร้างอินเวอร์เตอร์โดยใช้วิธีการเรโซแนนซ์ เพิ่มประสิทธิภาพของวงจรให้สูงขึ้น

2. การควบคุมอินเวอร์เตอร์แบบฮีสเตอริซีส

การสร้างกระแสชดเชยให้เป็นไปตามคำสั่งที่ได้ จากการควบคุมแบบฮีสเตอริซีส (Hysteresis) วิธีนี้อาศัยการควบคุมของแถบฮีสเตอริซีสในการสร้างกระแส โดยมีสวิตช์เป็นตัวกำหนดให้กระแสที่สร้างมีค่าขึ้น-ลง อยู่ภายใต้แถบฮีสเตอริซีสและเป็นไปตามคำสั่งกระแสชดเชย สามารถแสดงการทำงานของการควบคุมฮีสเตอริซีส ได้ดังภาพที่ 2.15



ก.



ข.

ภาพที่ 2.15 แสดงการควบคุมแบบฮีสเตอริซีส

(ก.) ไดอะแกรมการควบคุมแบบฮีตเตอริซีส

(ข.) สัญญาณการควบคุมแบบฮีตเตอริซีส

การควบคุมแบบฮีสเตอริซีสอาศัยการเปรียบเทียบระหว่างคำสั่งกระแสชดเชยกับกระแสชดเชย ผลต่างของทั้งสองสัญญาณเป็นตัวกำหนดการทำงานของอินเวอร์เตอร์ ว่าให้จ่ายแรงดันเป็นค่าบวกหรือลบ ถ้าผลต่างที่ได้มีค่าถึงค่าพิกัดสูงสุดของแถบฮีสเตอริซีส อินเวอร์เตอร์ทำการสวิตช์ตัดเปลี่ยนเป็นจ่ายแรงดันค่าลบแทน และกลับมาจ่ายค่าแรงดันบวกอีกครั้งหนึ่งเมื่อผลต่างที่ได้มีค่าถึงค่าพิกัดต่ำสุดของแถบฮีสเตอริซีส ข้อจำกัดของการควบคุมแบบนี้คือ ความถี่ในการสวิตช์ที่ไม่ได้มีค่าคงที่ และความถี่สูงสุดในการสวิตช์เป็นไปตามสมการที่ (2.9)

$$f_{sw(max)} = \frac{V_{dc}}{9hL} \tag{2.9}$$

โดยที่

$f_{SW(\max)}$	คือค่าความถี่สูงสุดของการสวิตช์
V_{DC}	คือค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทางด้านอินเวอร์เตอร์ (V)
h	คือค่าความกว้างของแถบฮีสเตอริซีส (V)
L	คือค่าตัวเหนี่ยวนำที่กระแสชดเชยไหลผ่าน (H)

2.5 ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller)

เป็นอุปกรณ์ไอซี (IC: Integrated Circuit) ที่สามารถโปรแกรมการทำงานได้ซับซ้อน สามารถรับข้อมูลในรูปสัญญาณดิจิตอลเข้าไปทำการประมวลผลแล้วส่งผลลัพธ์ข้อมูลดิจิตอลออกมาเพื่อนำไปใช้งานตามที่ต้องการได้

ไมโครคอนโทรลเลอร์ภายในชิพจะมีหน่วยความจำ (Port) อยู่ในชิพเพียงตัวเดียวซึ่งอาจจะเรียกได้ว่าเป็นคอมพิวเตอร์ชิพเดี่ยว ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นไมโครโพรเซสเซอร์ชนิดหนึ่ง เช่นเดียวกับหน่วยประมวลผลกลาง (CPU: Central Processing Unit) ที่ใช้ในคอมพิวเตอร์ แต่ได้รับการพัฒนาแยกออกมาภายหลังเพื่อนำไปใช้ในวงจรทางด้านงานควบคุม คือ แทนที่ในการใช้งานจะต้องต่อวงจรภายนอกต่าง ๆ เพิ่มเติมเช่นเดียวกับไมโครโปรเซสเซอร์ ก็จะทำการรวมวงจรที่จำเป็น เช่น หน่วยความจำ ส่วนอินพุท/เอาท์พุท บางส่วนเข้าไปในตัว ไอซีเดียวกัน และเพิ่มวงจรบางอย่างเข้าไปด้วยเพื่อให้มีความสามารถเหมาะสมกับการใช้ในงานควบคุม เช่น วงจรตั้งเวลา วงจรการสื่อสารอนุกรม วงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล เป็นต้น

ไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวาง โดยมักจะเป็นการนำไปใช้ฝังในระบบของอุปกรณ์อื่น ๆ (Embeded Systems) เพื่อใช้ควบคุมการทำงานบางอย่าง

ไมโครคอนโทรลเลอร์มีหลายยี่ห้อ หลายตระกูล และหลายเบอร์ด้วยกัน ซึ่งแต่ละเบอร์ก็จะมีโครงสร้างภายในและความสามารถในการทำงานที่แตกต่างกันทำให้เลือกใช้กับงานได้อย่างเหมาะสม ในโครงงานนี้ใช้ ไมโครคอนโทรลเลอร์ C2000 รายละเอียดจะกล่าวในบทที่ 3

2.6 วงจรการตรวจจับของสัญญาณ [8]

เป็นส่วนที่ใช้รับสัญญาณจากกระบวนการในตอนแรก คือ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ตรวจจับรับความรู้สึกตัวแปรทางกายภาพตัวใดตัวหนึ่งแล้วเปลี่ยนค่าทางด้านเอาต์พุตให้เป็นตัวแปรทางกายภาพตัวอื่น

1. วงจรตรวจจับกระแสแบบฮอลล์

Hall Effect Current Sensor สามารถวัดค่ากระแสโดยการวัดคล้องสายของกระแสที่ไหลและให้เอาท์พุตออกมาเป็นแรงดันแต่ hall ส่วนใหญ่จะใช้เป็น Instrument สำหรับความแม่นยำสูง สามารถวัดสัญญาณที่มี DC และฮาร์มอนิกปะปนมาก็ได้ หรือกระแสที่มีความซับซ้อนของสัญญาณปะปนสูงเหมาะสำหรับการต้องวัดเพื่อวิเคราะห์หาฮาร์มอนิกต่างๆ การเลือกใช้ต้องระวัง แบนวิดท์ (ความถี่ใช้งาน)ด้วยการวัดกระแสไฟฟ้าโดย Hall Sensor

การใช้งานฮอลล์เซนเซอร์เป็นการใช้วัดค่าความเข้มของฟลักซ์แม่เหล็ก เมื่อความเข้มของฟลักซ์แม่เหล็กเปลี่ยนแปลงตามระยะทาง ดังนั้นเราจึงสามารถนำฮอลล์เซนเซอร์มาใช้เป็นเซนเซอร์วัดการกระจัดได้เช่นกัน

นอกจากใช้วัดสนามแม่เหล็กทั่วไปแล้ว ฮอลล์เซนเซอร์ยังถูกนำมาประยุกต์ใช้งานในการวัดกระแสไฟฟ้าโดยวิธีฮอลล์เอฟเฟคอีกด้วย โดยปกติแล้วการใช้แอมป์มิเตอร์วัดกระแสในวงจรต้องวัดแบบอนุกรมเราอาจต้องตัดวงจรเพื่ออนุกรมมิเตอร์เข้าไปแต่ฮอลล์เอฟเฟคจะทำให้การวัดง่ายขึ้น เมื่อเราผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในขดลวด จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นรอบๆขดลวด เรียกว่า แม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งถ้าเราสามารถวัดสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นนี้ได้ เราก็สามารถคำนวณเป็นค่ากระแสออกมาได้เช่นกัน

2. วงจรตรวจจับแรงดัน

ในประเภทวงจรตรวจจับระดับแรงดันแบ่งได้ 2 ประเภท คือ วงจรตรวจจับระดับแรงดันไฟสลับและวงจรตรวจจับระดับแรงดันไฟตรง

การตรวจจับสัญญาณแรงดันไฟสลับ ทำโดยการจับสัญญาณแรงดันจากการไฟฟ้าเพื่อนำสัญญาณที่ได้นี้ไปเป็นสัญญาณอ้างอิงให้กับส่วนการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิก วงจรที่ใช้ในการตรวจจับสัญญาณแรงดันของวงจรควบคุมนั้นจะใช้ไอซีขยายสำหรับแยกโดด(Isolation Amplifiers) เพื่อทำการแยกกราวด์จากแรงดันการไฟฟ้า โดยแรงดันที่รับเข้ามาจะมีระดับแรงดันขนาด 220 โวลต์ ซึ่งไม่สามารถที่จะนำระดับแรงดันขนาดนั้นมาเข้าสู่ไอซีขยายสำหรับแยกโดดได้ ดังนั้นต้องทำการลดระดับแรงดันด้วยวิธีการลดทอนแรงดัน ซึ่งใช้ความต้านทานมาเป็นส่วนแบ่งของแรงดัน (Voltage Divider) เมื่อได้ระดับแรงดันที่เหมาะสมแล้วนำมาผ่านวงจรปรับอัตราขยายให้เหมาะสมแล้วทำการยกระดับออฟเซตของสัญญาณไปที่ 2.5 โวลต์ จากนั้นจะส่งไปยังวงจรปรับแต่งรูปสัญญาณเพื่อให้สัญญาณที่รับเข้ามามีระดับแรงดันเหมาะสมกับพอร์ตของตัวควบคุมสัญญาณดิจิตอลที่ใช้ทำหน้าที่แปลงสัญญาณเอาท์พุทมีค่าเกิน 5 โวลต์ และต้องเป็นระดับสัญญาณบวกเท่านั้น โดยใช้ไดโอดในการตัดแต่งสัญญาณแล้วทำการส่งไปยังตัวควบคุมสัญญาณดิจิตอลเพื่อนำไปประมวลผลต่อไป

การตรวจจับระดับแรงดันไฟตรง เพื่อนำมาใช้ในการรักษาระดับแรงดันของตัวเก็บประจุ ในส่วนของวงจรตรวจจับระดับแรงดันไฟตรงนี้จะมีลักษณะเหมือนกับวงจรที่ใช้ในการตรวจจับระดับแรงดันไฟสลับ แต่ต่างกันตรงที่วงจรในส่วนนี้ไม่ต้องทำการปรับระดับออฟเซตของสัญญาณไปที่ 2.5 โวลต์ แต่ต้องปรับระดับออฟเซตของสัญญาณไปที่ 0 โวลต์แทนเนื่องจากในการตรวจจับสัญญาณแรงดันไฟตรงนี้จะไม่มีส่วนของสัญญาณลบ โดยใช้ไดโอดในการตัดแต่งสัญญาณแล้วทำการส่งไปยังตัวควบคุมสัญญาณดิจิตอลเพื่อนำไปประมวลผลต่อไป

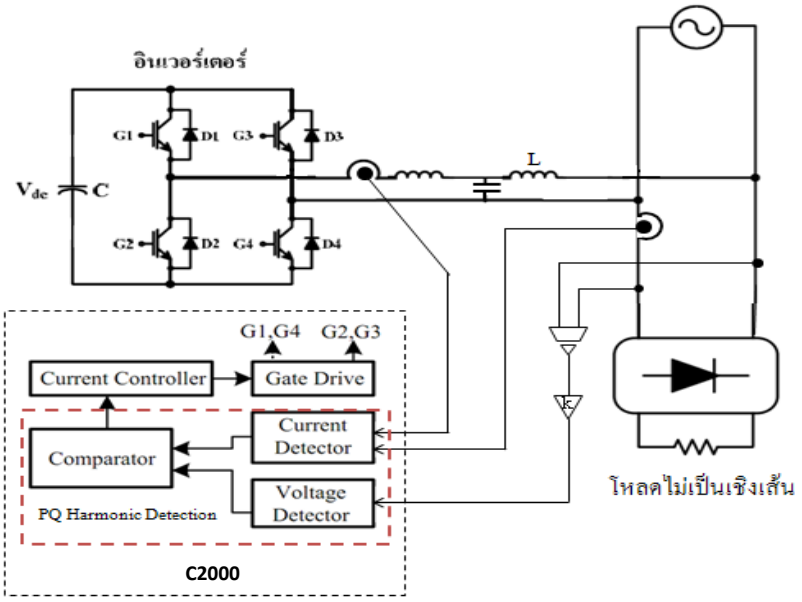
บทที่ 3

การออกแบบโครงงาน

ในบทนี้จะกล่าวถึงลักษณะโครงสร้างของระบบควบคุม และวงจรกำลังของวงจรกรองกำลังแอคทีฟที่ได้ออกแบบสร้างเครื่องต้นแบบประกอบด้วยวงจรกำลังของวงจรกรองกำลังแอคทีฟอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันที่ทำหน้าที่สร้างกระแสชดเชย วงจรการตรวจจับกระแส วงจรการตรวจจับแรงดัน และไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อที่จะนำมาชดเชยกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดจากโหลดชนิดไม่เป็นเชิงเส้นประเภทต่างๆ

3.1 การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอคทีฟ

การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอคทีฟที่ควบคุมกระแสชดเชยจะใช้วงจรกรองกำลังแอคทีฟแบบขนาน ที่มีโครงสร้างเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันที่ประกอบด้วยสวิตช์ไอจีบีที (IGBT) จานวน 4 ตัว เพื่อทำหน้าที่ฉีดกระแสชดเชยให้กับระบบ ซึ่งพิจารณาได้ตามภาพที่ 3.1 ดังนี้



ภาพที่ 3.1 การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอคทีฟแบบขนาน

จากภาพที่ 3.1 การตรวจจับฮาร์มอนิกจะใช้วิธี PQ ที่มีการปรับปรุงสมรรถนะการตรวจจับ ซึ่งพิจารณาได้จากบล็อก PQ Harmonic Detection ส่วนบล็อก Current Controller เป็นบล็อกสาหรับใช้ควบคุมการทำงานของไอจีบีทีที่นำมาสร้างเป็นวงจรกรองกำลังแอคทีฟให้ฉีดกระแสชดเชยได้ตามรูปสัญญาณกระแสอ้างอิงที่ได้จากการตรวจจับฮาร์มอนิก เมื่อพิจารณาการทำงานของวงจรกรองกำลังแอคทีฟแบบขนาน ไอจีบีทีจะทำงานเป็นกิ่งและในแต่ละกิ่งจะทำงานอิสระต่อกันซึ่งพบว่า ถ้าไอจีบีทีตัวบนนำกระแส ไอจีบีทีตัวล่างจะหยุดนำกระแสจึงส่งผลให้กระแสชดเชยมีค่าเพิ่มขึ้นตามรูปสัญญาณกระแสอ้างอิง ในทำนองเดียวกันเมื่อไอจีบีทีตัวบนหยุดนำกระแส ไอจีบีทีตัวล่างจะนำกระแสแทน ส่งผลให้กระแสชดเชยมีค่าลดลง โดยจะเป็นเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ ตลอดการทำงาน

3.2 การออกแบบและสร้างวงจรกำลัง

อินเวอร์เตอร์ทำหน้าที่เชื่อมต่อเข้ากับระบบการไฟฟ้าด้วยการควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าและกำจัดฮาร์มอนิกเพื่อแก้ไขตัวประกอบกำลัง จากภาพที่ 3.3 แสดงถึงส่วนประกอบของอินเวอร์เตอร์มีดังนี้

1. ตัวเก็บประจุไฟตรง

ตัวเก็บประจุไฟตรงเป็นอุปกรณ์ที่ใช้รักษาระดับแรงดันไฟตรงด้านเอาท์พุตและเป็นอุปกรณ์ในการเก็บพลังงานเพื่อจ่ายให้กับอินเวอร์เตอร์ในการทำหน้าที่จ่ายกำลังไฟฟ้าและประพฤติตัวเป็นวงจรกรองกำลังแอคทีฟ เนื่องจากวงจรอินเวอร์เตอร์ที่นำมาใช้ในการวิจัยนี้เป็นชนิดแหล่งจ่ายแรงดันที่ต่อขนานอยู่กับระบบ ขนาดของตัวเก็บประจุนั้นขึ้นอยู่กับพิกัดกำลังไฟฟ้าของวงจรกรองกำลังแอคทีฟและชนิดของโหลด สำหรับเครื่องต้นแบบได้เลือกใช้ค่าความของตัวเก็บประจุขนาด 1,000 μF ต่ออนุกรมกัน

2. ตัวเหนี่ยวนำกรองกระแส

การเชื่อมโยงระหว่างวงจรอินเวอร์เตอร์เข้ากับระบบการไฟฟ้าทำการเชื่อมโยงผ่านตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งหน้าที่ของตัวเหนี่ยวนำคือทำการกรองระลอกคลื่นกระแสที่เกิดจากการสวิตซ์ของวงจรอินเวอร์เตอร์ ทำให้กระแสชดเชยที่จ่ายจากอินเวอร์เตอร์มีความเรียบมากขึ้น การออกแบบและสร้างส่วนวงจรกำลัง คำนึงถึงองค์ประกอบต่างๆ ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบเพื่อการพิจารณาในการสร้างวงจรอินเวอร์เตอร์

องค์ประกอบ	ค่าที่ปรากฏ	ค่าที่ออกแบบ
แรงดันขาเข้า invertor	440V	600V
แรงดันขาออก CE	440V	600V
กำลังงานด้านขาออก Qout	750Var	750Var
ความถี่ในการสวิตช์ Fsw	5KHz	5KHz

เลือก ไอจีบีที เบอร์ T0247AC ที่มีพิกัดในการใช้งานตรงกับความต้องการ

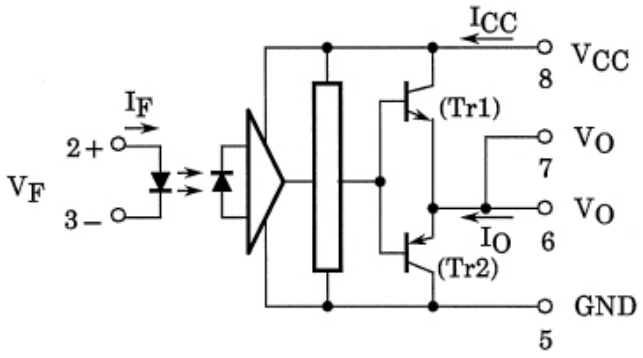
ตารางที่ 3.2 พิกัดในการใช้งาน

สวิตช์ควบคุม	พิกัดแรงดัน	พิกัดกระแส	ความถี่ในการสวิตช์	ความต้านทาน Ron
IHW20T120	1200V	20A	5KHz	28Ω

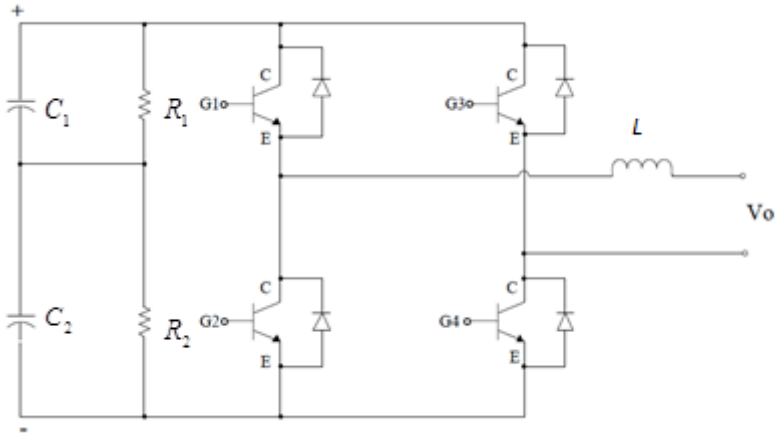
ภาคขับ ไอจีบีที ใช้ IC Opto Coupler เบอร์ TLP250 ดังแสดงในภาพที่ 3.2 ซึ่งมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติ IC Opto Coupler เบอร์ TLP250

องค์ประกอบ	ค่าพิกัด
กระแสอินพุทเพื่อขับวงจร(I_F)	5mA(max.)
กระแสใช้งาน(I_{CC})	11mA(max.)
แรงดันใช้งาน(V_{CC})	10 - 35V DC
กระแสด้านขาออกเพื่อขับเกต(I_O)	1.5A(max.)
แยกกาวและคอมมอนจากกระแสไฟ(Isolation voltage)	2500Vrms(min.)



ภาพที่ 3.2 ไดอะแกรมภายในของ IC TLP250 เพื่อใช้เป็นภาคขับ IGBT



ภาพที่ 3.3 อินเวอร์เตอร์ 1 เฟส แบบฟูลบริดจ์

3.3 ตัวตรวจจับ

เป็นส่วนที่ใช้รับสัญญาณจากกระบวนการในตอนแรก คือ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ตรวจจับกระแสและตรวจจับแรงดันเพื่อตรวจสอบเปรียบเทียบของกระแสกับแรงดัน

1. ตัวตรวจจับกระแส

การตรวจจับสัญญาณกระแสของวงจรควบคุมนี้สามารถแบ่งออกเป็น 2 จุด คือ จุดแรกตรวจจับสัญญาณกระแสจากส่วนการตรวจจับกระแสที่แหล่งจ่ายอินเวอร์เตอร์ จุดที่สอง ตรวจจับสัญญาณกระแสจากโหลดเพื่อใช้หาค่ากระแสฮาร์มอนิกของกระแสโหลด ซึ่งในโครงงานนี้ใช้พิกัดของกระแสไม่เกิน 10A ดังนั้นจึงเลือกใช้ตัวตรวจจับกระแส LEM เบอร์ LA25-NP จากภาพที่ 3.4

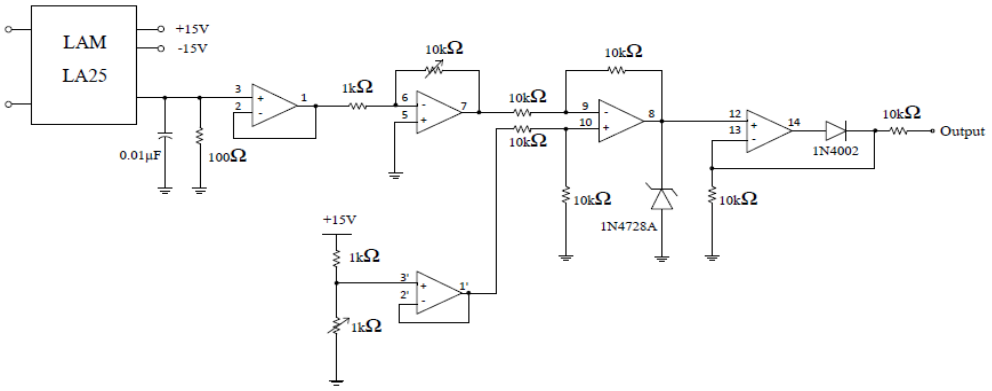
เซนเซอร์กระแส เบอร์ LA25-NP ของ LEM สามารถวัดกระแสได้สูงสุด 25A วัดได้ทั้งกระแสตรงและกระแสสลับ ให้เอาท์พุตออกมาเป็นกระแสในอัตราส่วน 1:1000 หมายความว่า ถ้าวัดกระแส 25A เซนเซอร์ตัวนี้จะให้กระแสเอาท์พุต 25 mA

สำหรับการใช้งานก็เพียงป้อนไฟเลี้ยง ±15V ให้กับเซนเซอร์ แล้วให้เส้นลวดที่เราต้องการวัดกระแสสอดเข้าที่รูตรงกลางเซนเซอร์เท่านั้นเอง จึงไม่ส่งผลกระทบต่อวงจรที่เราจะทำการวัดแต่อย่างใด

ตารางที่ 3.4 คุณสมบัติตัวตรวจจับกระแส LEM เบอร์ LA25-NP

องค์ประกอบ	ค่าพิกัด
กระแสของโหลดสูงสุด(I_L)	25A
แรงดันใช้งาน(V_{cc})	14.25-17.25V
กระแสใช้งาน(I_{cc})	10mA
ความถี่สูงสุด	150kHz
ระยะเวลาตอบสนอง	1μs

ภาพที่ 3.4 โครงสร้างตรวจจับกระแส เบอร์ LA25-NP



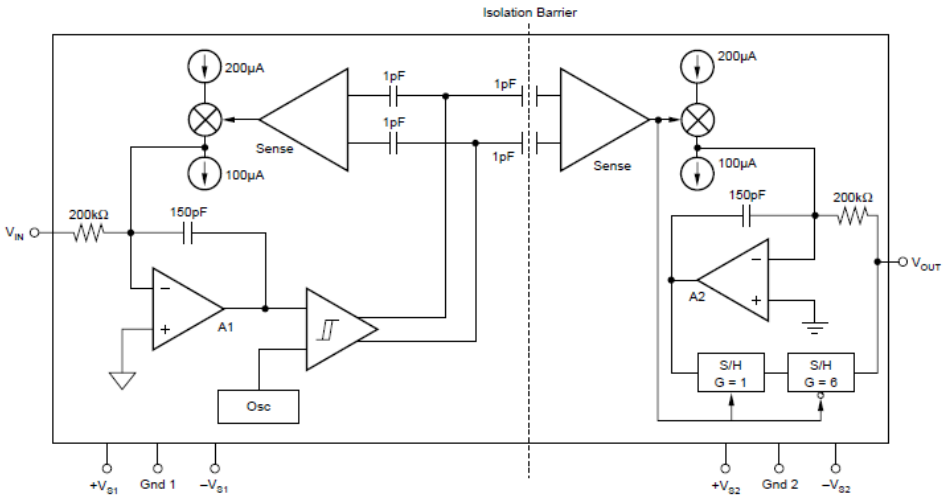
ภาพที่ 3.5 วงจรตรวจจับสัญญาณกระแส

2. ตัวตรวจจับแรงดัน

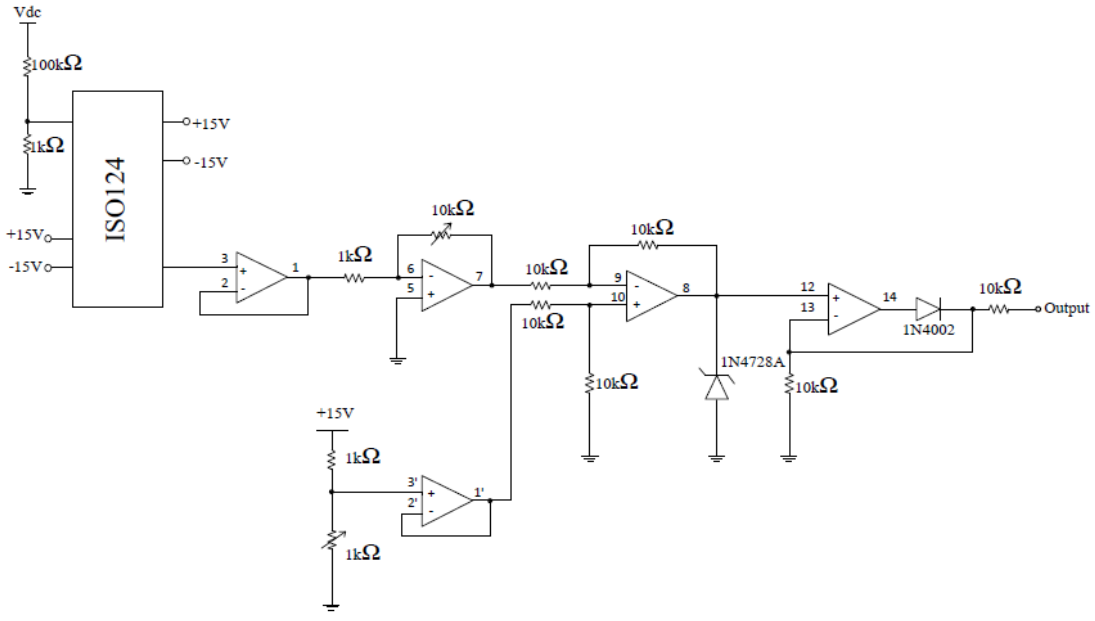
ในโครงงานนี้เลือกใช้ประเภทวงจรตรวจจับระดับแรงดัน คือ วงจรตรวจจับระดับแรงดันไฟสลับ การตรวจจับสัญญาณแรงดันไฟสลับนั้น ทำโดยการจับสัญญาณแรงดันจากการไฟฟ้าเพื่อนำสัญญาณที่ได้นี้ไปเป็นสัญญาณอ้างอิงให้กับส่วนการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิก วงจรที่ใช้ในการตรวจจับสัญญาณแรงดันของวงจรควบคุมนั้นจะใช้ไอซี เบอร์ ISO124 โดยแรงดันที่รับเข้ามาจะมีระดับแรงดันขนาด 220 โวลต์

ตารางที่ 3.5 คุณสมบัติไอซี เบอร์ ISO124

องค์ประกอบ	ค่าพิกัด
ทดสอบ BREAKDOWN แรงดันสูง	100%
Rated	1500V_{rms}
แรงดันเอาท์พุท	± 10V
แรงดันใช้งาน	± 4.5V - ± 18V



ภาพที่ 3.6 ไดอะแกรมภายในของ IC ISO124



ภาพที่ 3.7 วงจรตรวจจับสัญญาณแรงดัน

3.4 ไมโครคอนโทรลเลอร์

เป็นอุปกรณ์ที่รับค่ามาจากการตรวจจับแล้วเปลี่ยนแปลงค่าฮาร์มอนิกที่วัดได้จากอนาลอกเป็นดิจิตอลเพื่อการคำนวณ การคำนวณในระบบดิจิตอลโดยใช้ไมโครโปรเซสเซอร์จะมีความแม่นยำและน่าเชื่อถือแล้วจึงส่งสัญญาณควบคุมไปยังภาคขับไอจีบีทีใช้ IC Opto Coupler เบอร์ TLP250 เพื่อจ่ายกระแสฮาร์มอนิกที่มีในระบบไฟฟ้า แต่มีทิศทางตรงข้ามกันเพื่อหักล้างกระแสฮาร์มอนิกนั้น

ไมโครคอนโทรลเลอร์ในโครงงานนี้เลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ C2000 ของบริษัท Texas Instruments เป็นทางเลือกหนึ่งของนักพัฒนาไมโครคอนโทรลเลอร์ในประเทศไทยตั้งแต่ปลายทศวรรษ 1990 และมีการนำไมโครซอฟท์ที่มีการพัฒนามาใช้อย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะอนุกรม f28x ที่ใช้ในการควบคุมการ์ดต่ออยู่กับบอร์ด ส่งสัญญาณจนมาถึง GPIO และ ADC ซึ่งทั้งหมดที่กล่าวถึงนั้น ตัวซีพียูภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ยังอยู่ที่ขนาด 8 บิต

ในปี ค.ศ. 2004 Texas Instruments ได้พัฒนาไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่นใหม่ที่ประมวลผลในระดับ 12 บิต ออกมาใช้งานภายใต้ชื่อเรียกขานอย่างเป็นทางการว่า TMS320C2000 จุดเด่นของ C2000 คือ ใช้คำสั่งโดยโปรแกรม MATLAB เข้ามาแทนโปรแกรมภาษาแอสเซมบลี และภาษา C การประมวลผลสัญญาณดิจิตอล โดยมีการเพิ่มขีดความสามารถของหน่วยประมวลผลกลาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งด้านการคำนวณทางคณิตศาสตร์ เนื่องจากเป็นหัวใจของการประมวลผลสัญญาณดิจิตอล และสามารถประมวลผลข้อมูลขนาด 12 บิต อย่างแท้จริง นอกจากนั้นยังเพิ่มความเร็วในการประมวลผลเพื่อให้สามารถรองรับการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณดิจิตอล นั่นคือเพิ่มความสามารถของโมดูลแปลงสัญญาณดิจิตอล (ADC) ให้สามารถสุ่มสัญญาณได้เร็วขึ้นและมีความละเอียดขนาด 10 บิต และ 12 บิต

ด้านเครื่องมือในการพัฒนาทางซอฟต์แวร์ สามารถพัฒนาด้วยโปรแกรม MATLAB ผ่านทางชุดซอฟต์แวร์ที่ชื่อ ICF28335 ร่วมกับ C ร่วมกับบอร์ด Experimanter Kit-Delfino F28335 ทำให้การพัฒนาโปรแกรมของไมโครคอนโทรลเลอร์ C2000 สามารถกระทำได้อย่างสะดวกและง่ายขึ้น

1. คุณสมบัติเด่นโดยรวมของ C2000

- ความเร็วในการทำงานสูงถึง 150 ล้านคำสั่งต่อวินาที
- ใช้คำสั่งโปรแกรม MATLAB แทนภาษาแอสเซมบลีและภาษาซี รองรับรูปแบบการอ้างแอดเดรสได้อย่างอิสระ
- มีหน่วยความจำโปรแกรมเป็นแบบแฟลช สามารถลบและเขียนใหม่ได้ไม่น้อยกว่า 100,000 ครั้ง สามารถป้องกันการอ่านได้ และสามารถโปรแกรมตัวเองโดยผ่านกระบวนการทางซอฟต์แวร์
- มีหน่วยความจำอีอีพรอมที่สามารถลบ และเขียนใหม่ได้ไม่น้อยกว่า 1,000,000 ครั้ง
- มีอินเตอร์รัพท์เวกเตอร์จำนวนมาก รองรับการตอบสนองการอินเตอร์รัพท์ได้ดี
- มีวงจรตรวจจับแรงดันไฟเลี้ยงต่ำกว่ากำหนดแบบโปรแกรมได้
- มีเพาเวอร์-ออนรีเซต, เพาเวอร์อัปไทม์เมอร์ และออสซิลเลเตอร์สตาร์ท-อัปไทม์เมอร์
- มีวอตช์ดอกไทม์เมอร์แบบโปรแกรมได้
- มีวงจรตรวจสอบการทำงานของวงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกา
- สามารถเลือกโหมดการใช้พลังงานได้

2. คุณสมบัติด้านการประมวลผล

- มีหน่วยประมวลผลด้านการคูณและการหารเลข 17 บิต ในรูปของฮาร์ดแวร์ จึงทำให้สามารถคูณและหารเลขได้อย่างรวดเร็ว
- ทำการคูณเลข 16 บิต ได้ภายในสัญญาณนาฬิกาภายใน 1 ไซเกิล
- มีวงจรเฟตข้อมูลค่า ช่วยให้การประมวลผลข้อมูลทำได้อย่างรวดเร็ว

3. คุณสมบัติของโมดูลฟังก์ชันพิเศษ

- สามารถจ่ายแรงดันออกทางพอร์ต USB ได้ไม่เกิน 5V
- มีโมดูลตรวจจับและเปรียบเทียบสัญญาณดิจิตอล
- มีส่วนเชื่อมต่ออุปกรณ์อนุกรมทั้งแบบ SPI และผ่านระบบบัส I2C
- มีโมดูลสื่อสารอนุกรม UART พร้อมบัฟเฟอร์แบบ FIFO
- มีโมดูลการแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลที่มีความละเอียด 10 บิต และ 12 บิต (ADC)
- มีโมดูลสร้างสัญญาณ PWM สำหรับควบคุมมอเตอร์ (MCPWM)
- มีโมดูลเชื่อมต่อตัวเข้ารหัสแบบควอดราเจอร์เอนโคดเดอร์ (QEI)

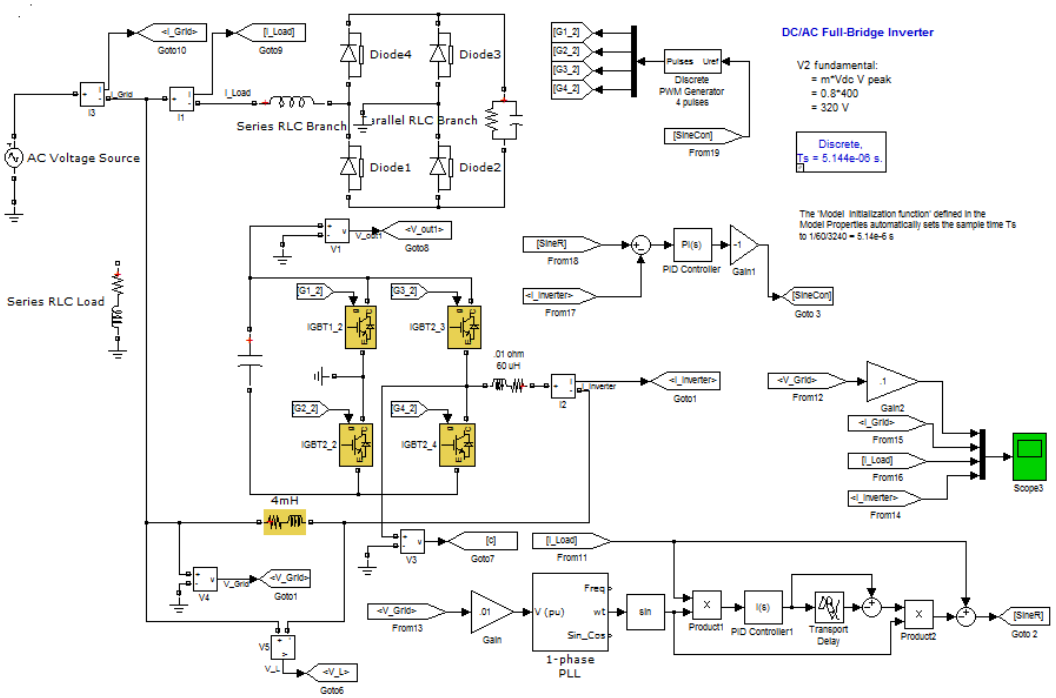
บทที่ 4

แบบจำลอง MATLAB

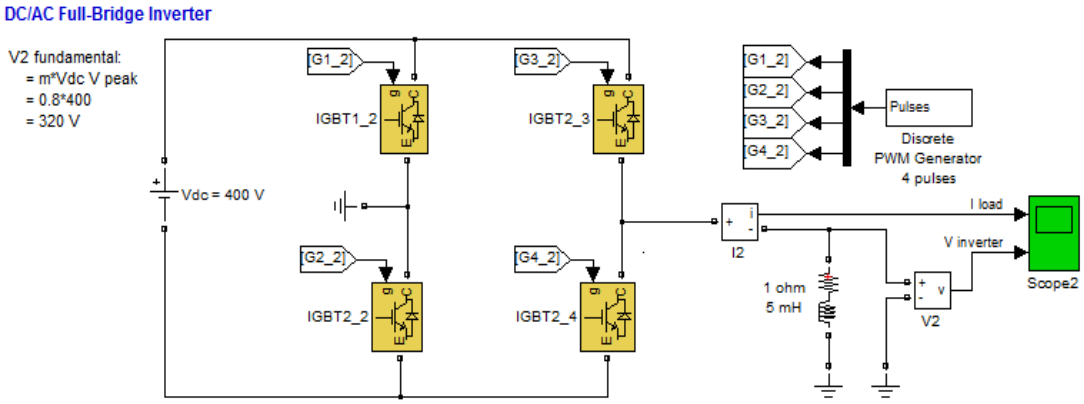
การตรวจสอบการทำงานของระบบเป็นสิ่งจำเป็นมากในการทดสอบระบบจริงทั้งระบบ ซึ่งเป็นการตรวจสอบการทำงานของระบบเพื่อใช้เปรียบเทียบกับทฤษฎีที่ได้ออกแบบไว้และที่สำคัญในกาทดสอบการทำงานของระบบคือเพื่อลดความผิดพลาดที่อาจจะเกิดในการทดสอบระบบจริง โดยการทดสอบการทำงานนี้จะพิจารณาในส่วนการทำงานของผลการตรวจสอบการคำนวณหากระแส

4.1 การจำลองวงจรแอคทีฟฟิลเตอร์ต่อขนานกับโหลดไม่เป็นเชิงเส้น

ในโครงงานนี้ได้ทำการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK สร้างแบบจำลองวงจรกำลังแอคทีฟฟิลเตอร์ต่อขนานกับโหลดไม่เป็นเชิงเส้น เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาโครงงานนี้ ดังภาพที่ 4.1 ส่วนแบบจำลองตัวควบคุมการฉีดกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอคทีฟฟิลเตอร์ใช้ตัวควบคุมการสวิตช์แบบพีดับเบิลยูเอ็ม ดังภาพที่ 4.2 ซึ่งวงจรทั้งสองต้องทำงานร่วมกัน



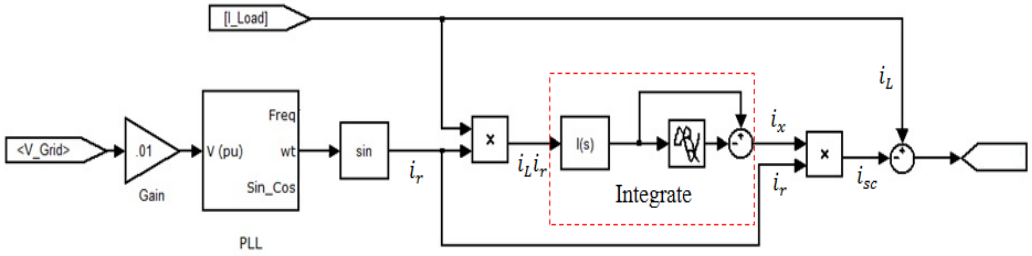
ภาพที่ 4.1 บล็อกไดอะแกรมของวงจรแอคทีฟฟิลเตอร์ต่อขนานกับโหลดไม่เป็นเชิงเส้น



ภาพที่ 4.2 บล็อกไดอะแกรมของวงจรอินเวอร์เตอร์พีดับเบิลยูเอ็ม

4.2 ผลการทดสอบการคำนวณหากระแส

บล็อกไดอะแกรมของวงจรการคำนวณกระแสสำหรับตัวกรองแอคทีฟ ดังภาพที่ 4.3



ภาพที่ 4.3 บล็อกไดอะแกรมของวงจรการคำนวณสำหรับตัวกรองแอคทีฟ

โดยเริ่มจากการรับสัญญาณแรงดันที่จ่ายโหลด (V_S) เป็นสัญญาณซายน์เวฟ (50Hz) เพื่อเป็นสัญญาณซายน์เวฟอ้างอิงกับกระแส จากนั้นมีการลดเกณฑ์ลง 100 เท่า ของสัญญาณจริง จากนั้นก็สร้างสัญญาณกระแสอ้างอิง (i_r) ให้เป็นซายน์เวฟ แล้วนำสัญญาณกระแสของโหลด (i_l) ที่ไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งประกอบไปด้วยกระแสมูลฐานรวมกันกับกระแสฮาร์มอนิกรวมอยู่แล้วเข้าขบวนการอินทิเกรตจะได้ค่าขนาดของกระแสอ้างอิงเป็นกระแส (i_x) แล้วนำสัญญาณกระแสอ้างอิง (i_r) ที่เป็นซายน์เวฟมาคูณกับขนาดของกระแสอ้างอิง (i_x) จะได้สัญญาณกระแสมูลฐาน (i_{sc}) ที่เป็นสัญญาณซายน์เวฟ แล้วนำสัญญาณกระแสของโหลด (i_l) มาลบกับสัญญาณกระแสมูลฐาน (i_{sc}) จะได้สัญญาณตรงข้ามกระแสฮาร์มอนิก (i_{cr}) ไปจ่ายชดเชยแทนการไฟฟ้าจากกระแสที่อ้างอิงดังกล่าวสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

แรงดันที่จ่ายให้กับโหลดเป็นสัญญาณซายน์เวฟ ดังสมการที่(4.1)

$$v_s(t) = v_P \sin(\omega t) \tag{4.1}$$

กระแสโหลดเป็นสัญญาณกระแสที่เป็นไม่เป็นเชิงเส้น ดังสมการที่ (4.2)

$$i_L(t) = \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \theta_n) \tag{4.2}$$

กระแสโหลดสามารถแยกเป็นกระแสมูลฐานรวมกับกระแสฮาร์มอนิก ดังสมการที่ (4.3)

$$i_L(t) = I_1 \sin(\omega t + \theta_1) + \sum_{n=2}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \theta_n) \quad (4.3)$$

สัญญาณกระแสที่อ้างอิงเป็นสัญญาณซายน์เวฟ ดังสมการที่ (4.4)

$$i_r(t) = \sin(\omega t) \quad (4.4)$$

ขนาดของกระแสโดยวิธีการอินทิเกรต ดังสมการที่ (4.5)

$$i_x = \frac{1}{T}\int_0^T i_L(t) i_r(t) dt$$

$$= I_1 \cos\theta_1 \quad (4.5)$$

กระแสมูลฐานเป็นสัญญาณซายน์เวฟ ดังสมการที่ (4.6)

$$i_{sc}(t) = i_x i_r(t)$$

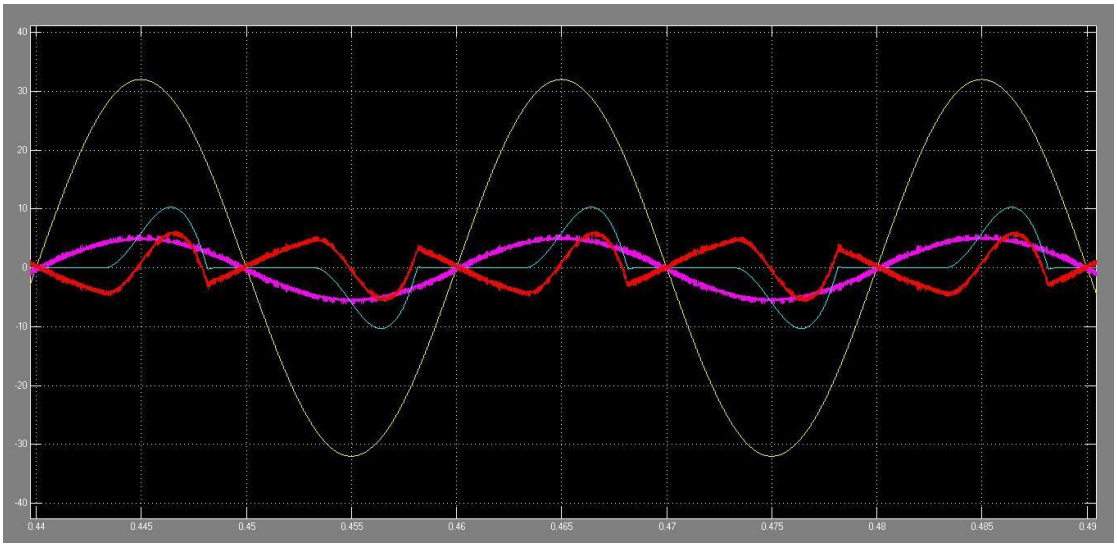
$$= i_1 \cos\theta_1 \sin(\omega t) \quad (4.6)$$

กระแสชดเชยฮาร์มอนิก ดังสมการที่ (4.7)

$$i_{cr}(t) = i_L(t) - i_{sc}(t)$$

$$= \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \theta_n) - i_1 \cos\theta_1 \sin(\omega t) \quad (4.7)$$

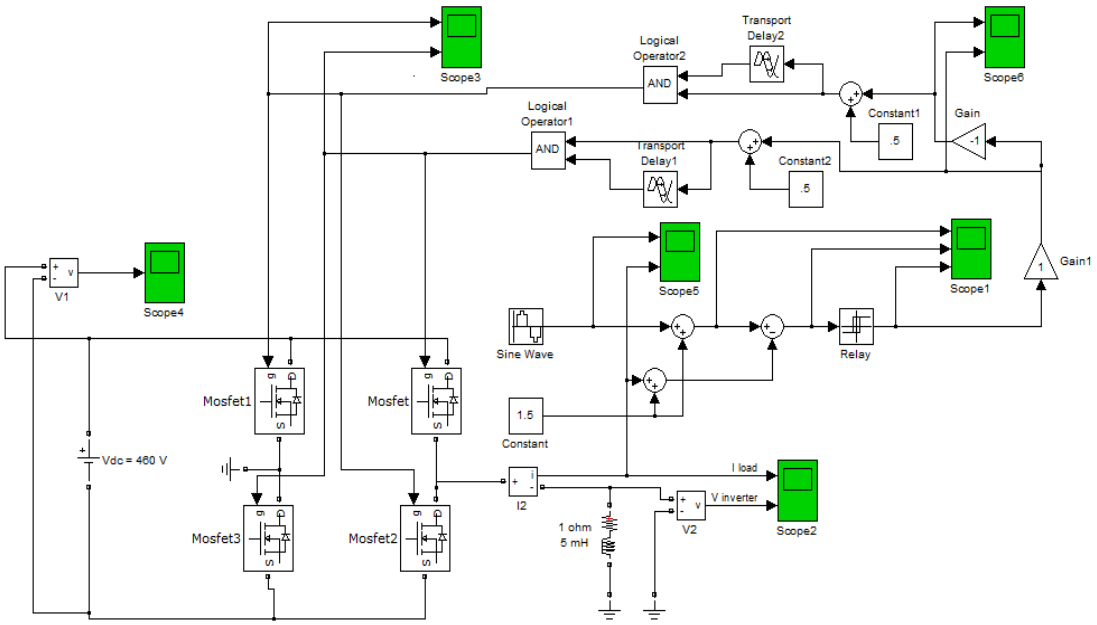
จากภาพที่ 4.2 กำหนดให้เส้นสัญญาณสีเหลืองเป็นสัญญาณแรงดันที่จ่ายให้กับโหลด $v_s(t)$ สีฟ้าเป็นสัญญาณกระแสที่จ่ายให้กับโหลด $i_L(t)$ สีแดงเป็นสัญญาณกระแสชดเชย $i_{cr}(t)$ สีม่วงเป็นสัญญาณกระแสมูลฐานของโหลด $i_{sc}(t)$



ภาพที่ 4.4 ผลการทดสอบการชดเชยกระแสใน MATLAB

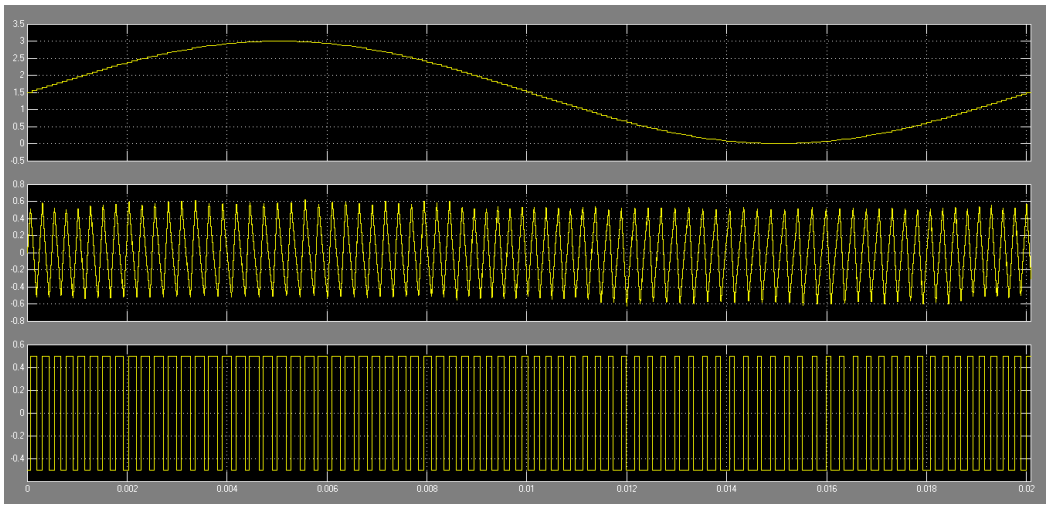
4.3 การจำลองวงจรอินเวอร์เตอร์จ่ายแรงดันควบคุมด้วยกระแสสำหรับตัวกรองแบบแอคทีฟ

ในโครงงานนี้ได้ทำการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK สร้างแบบจำลองวงจรอินเวอร์เตอร์จ่ายแรงดันควบคุมด้วยกระแสสำหรับตัวกรองแบบแอคทีฟ ดังภาพที่ 4.5 วงจรอินเวอร์เตอร์จ่ายแรงดันควบคุมด้วยกระแส



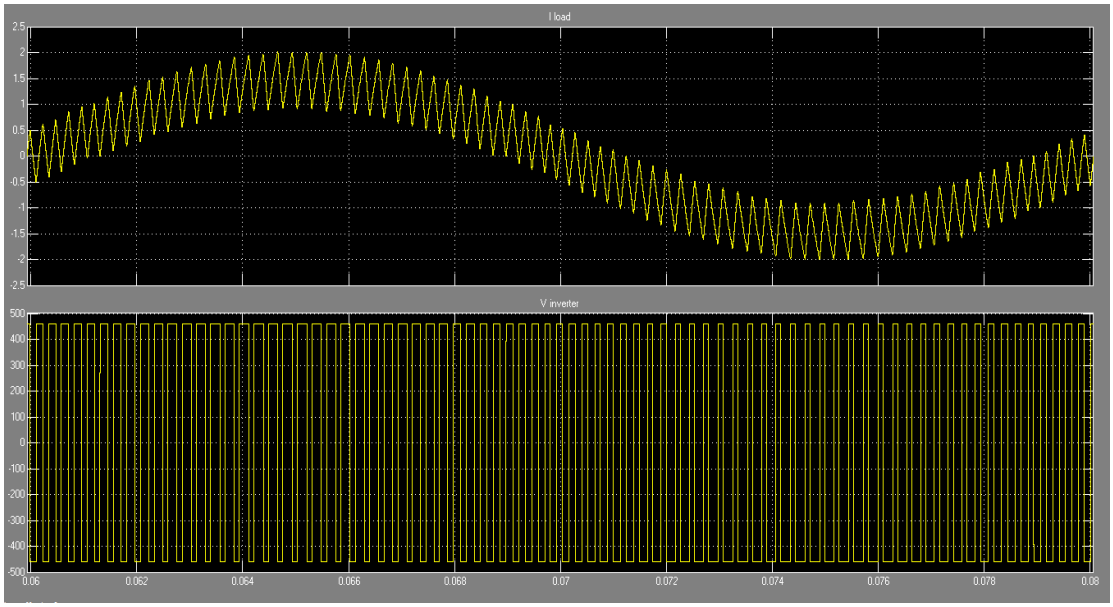
ภาพที่ 4.5 วงจรอินเวอร์เตอร์จ่ายแรงดันควบคุมด้วยกระแส

จากภาพที่ 4.5 จะได้ผลจากการจำลองวงจรอินเวอร์เตอร์จ่ายแรงดันควบคุมด้วยกระแสในส่วนต่างๆ ได้ดังภาพที่ 4.6 สัญญาณแรงดัน สัญญาณแรงดันและโหลดหักล้างกันและสัญญาณควบคุมอินเวอร์เตอร์และภาพที่ 4.7 สัญญาณกระแสโหลดและแรงดันอินเวอร์เตอร์



ภาพที่ 4.6 สัญญาณแรงดัน สัญญาณแรงดันและโหลดหักล้างกันและสัญญาณควบคุมอินเวอร์เตอร์

จากภาพที่ 4.6 สัญญาณด้านบนจะเป็นสัญญาณของแรงดันโดยมีการแบ่งแรงดันและมีการยกระดับออฟเซตของสัญญาณไปที่ 1.5 โวลต์ สัญญาณตรงกลางจะเป็นสัญญาณจากการนำสัญญาณแรงดันด้านบนมาลบกับสัญญาณกระแสโหลด ดังรูปสัญญาณด้านบนของ ภาพที่ 4.7 จากนั้นนำสัญญาณที่ได้เข้าสู่การควบคุมแบบฮีสเตอริซีส โดยกำหนดขอบฮีสเตอริซีสที่ 0.5 และ -0.5 จะได้รูปสัญญาณด้านล่างเพื่อนำไปควบคุมวงจรอินเวอร์เตอร์เพื่อจ่ายแรงดันให้กับโหลดความต้านทานต่ออนุกรมกับโหลดเหนี่ยวนำ



ภาพที่ 4.7 สัญญาณกระแสโหลดและแรงดันอินเวอร์เตอร์(สลับรูปสัญญาณบนล่าง)

จากภาพที่ 4.7 สัญญาณด้านบนจะเป็นสัญญาณแรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์ที่มีการจ่ายแรงดันกระแสตรงที่ 460 Vdc และเมื่อจ่ายให้กับโหลดความต้านทานต่ออนุกรมกับโหลดเหนี่ยวนำ จะได้สัญญาณด้านล่างจะเป็นสัญญาณกระแสของโหลดความต้านทานต่ออนุกรมกับโหลดเหนี่ยวนำ ที่มีการเกาะขอบฮีสเตอริซีสไปตามกระแสโหลด

บทที่ 5

การทดลองและผลการทดลอง

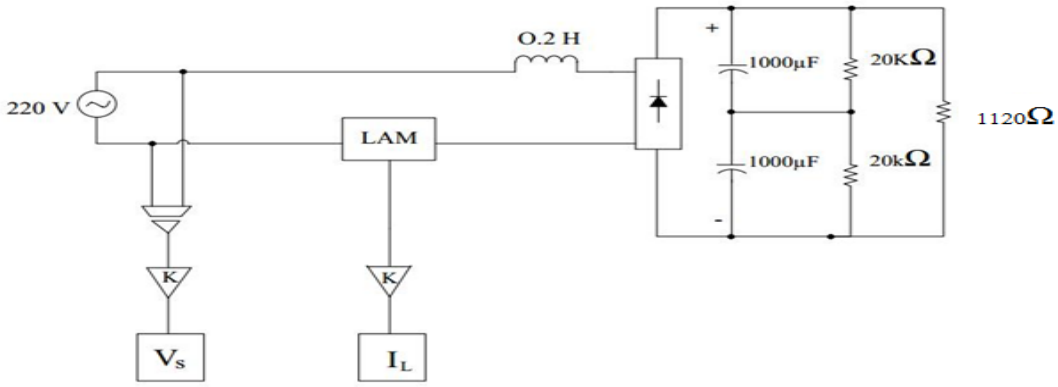
การทดลองการทำงานของระบบต้นแบบสามารถแยกพิจารณาผลการทดลองออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นการตรวจสอบการทำงานของส่วนควบคุมเพื่อพิจารณาความถูกต้องของการทำงานตามที่ออกแบบไว้ในทางทฤษฎี ส่วนที่สองเป็นผลการทดลองการทำงานของวงจรกำลังในการทดลองทั้งหมดทำเพื่อทดสอบหาประสิทธิภาพของระบบ

5.1 ผลการทดสอบการทำงานของการควบคุม

การตรวจสอบการทำงานของการควบคุมเป็นสิ่งจำเป็นมากในการทดสอบระบบจริงทั้งระบบ ซึ่งเป็นการตรวจสอบการทำงานของการควบคุมเพื่อใช้เปรียบเทียบกับทฤษฎีที่ได้ออกแบบไว้และที่สำคัญในการทดสอบการทำงานของการควบคุมคือเพื่อลดความผิดพลาดที่อาจจะเกิดในการทดสอบระบบจริง โดยการทดสอบการทำงานนี้จะพิจารณาทั้งในส่วนการทำงานของตัวควบคุมสัญญาณดิจิตอล

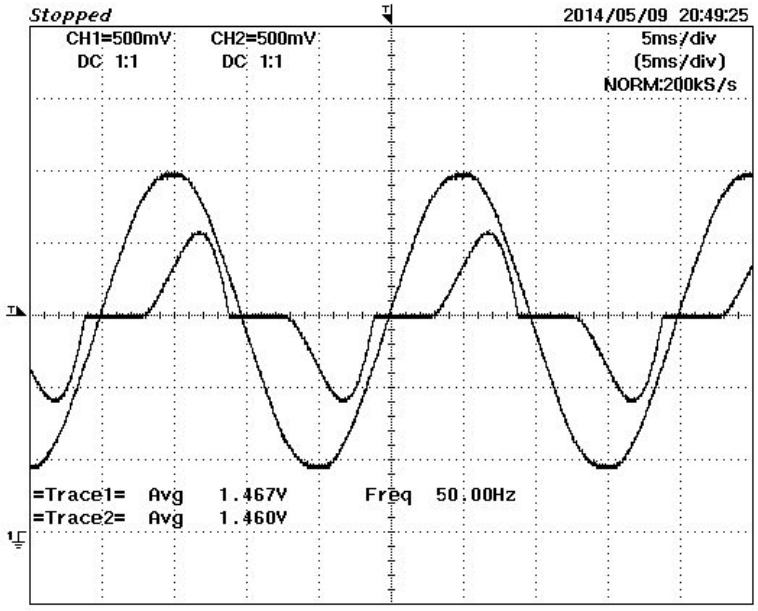
1. ผลการตรวจสอบวงจรตรวจจับกระแสและแรงดันอ้างอิง

เนื่องจากการประมวลผลสัญญาณของวงจรควบคุมจะต้องมีการรับสัญญาณทั้งกระแสและแรงดันจากจุดต่างๆ แล้วทำการส่งมายังตัวควบคุมสัญญาณดิจิตอล เพื่อนำสัญญาณเข้ามาทำการประมวลผลเพื่อสร้างสัญญาณที่ใช้ในการควบคุมภาคกำลังต่อไป จึงต้องมีการตรวจสอบวงจรตรวจจับ



ภาพที่ 5.1 ตำแหน่งการตรวจจับแรงดันและกระแส

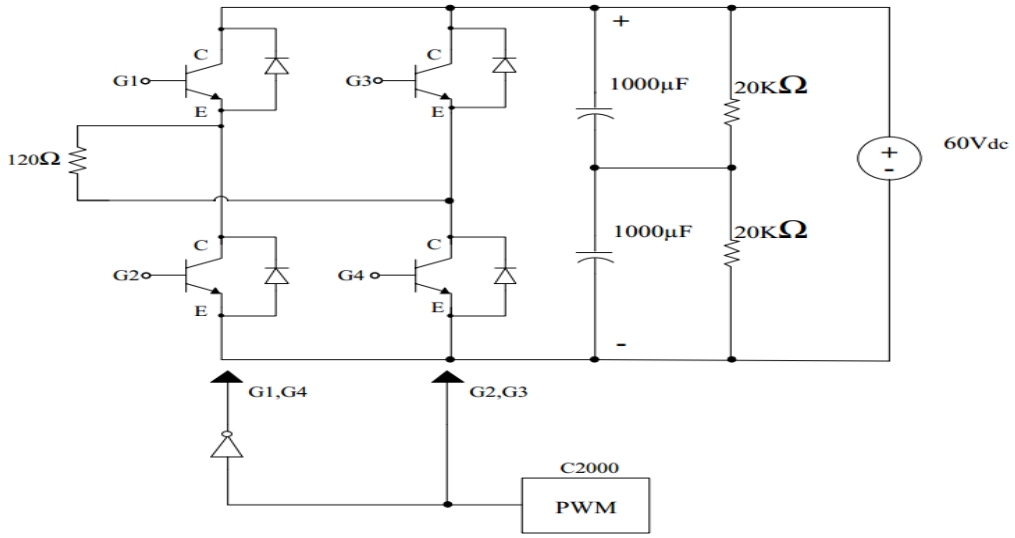
การตรวจจับสัญญาณกระแสของวงจรควบคุมนี้สามารถแบ่งออกเป็น 2 จุด คือ จุดแรก การตรวจจับสัญญาณแรงดันไฟสลับ ทำโดยการจับสัญญาณแรงดันจากการไฟฟ้า ซึ่งมีลักษณะวงจรตรวจจับแรงดันไฟสลับเหมือนที่กล่าวมาแล้วข้างต้นแสดงไว้ดังภาพที่ 3.7 วงจรที่ใช้ในการตรวจจับสัญญาณแรงดันของวงจรควบคุมนั้นจะใช้ไอซีขยายสำหรับแยกโดด(Isolation Amplifiers) เพื่อทำการแยกกราวด์จากแรงดันการไฟฟ้า โดยแรงดันที่รับเข้ามาจะมีระดับแรงดันขนาด 220 โวลต์ ซึ่งไม่สามารถที่จะนำระดับแรงดันขนาดนั้นมาเข้าสู่ไอซีขยายสำหรับแยกโดดได้ ดังนั้นต้องทำการลดระดับแรงดันด้วยวิธีการลดทอนแรงดัน ซึ่งใช้ความต้านทานมาเป็นส่วนแบ่งของแรงดัน (Voltage Divider) เมื่อได้ระดับแรงดันที่เหมาะสมแล้วนำมาผ่านวงจรปรับอัตราขยายให้เหมาะสมแล้วทำการยกระดับออฟเซตของสัญญาณไปที่ 1.5 โวลต์ จากนั้นจะส่งไปยังวงจรปรับแต่งรูปสัญญาณเพื่อให้สัญญาณที่รับเข้ามามีระดับแรงดันเหมาะสมกับพอร์ตของตัวควบคุมสัญญาณดิจิตอลที่ใช้ทำหน้าที่แปลงสัญญาณเอาท์พุทมีค่าเกิน 3 โวลต์ และต้องเป็นระดับสัญญาณบวกเท่านั้น โดยใช้ไดโอดในการตัดแต่งสัญญาณแล้วทำการส่งไปยังตัวควบคุมสัญญาณดิจิตอลเพื่อนำสัญญาณที่ได้นี้ไปเป็นสัญญาณอ้างอิงให้กับส่วนการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิก จุดที่สอง ส่วนการตรวจจับสัญญาณกระแสหน้าโหลดเพื่อใช้หาค่ากระแสฮาร์มอนิกของกระแสโหลด จากนั้นสัญญาณที่ได้จากตัวตรวจจับกระแสจะส่งไปยังวงจรที่ทำหน้าที่ขยายสัญญาณและปรับระดับออฟเซต ซึ่งมีลักษณะวงจรตรวจจับกระแสเหมือนที่กล่าวมาแล้วข้างต้นแสดงไว้ดังภาพที่ 3.5 คลื่นสัญญาณแรงดันจากการไฟฟ้าและกระแสโหลดที่มีฮาร์มอนิกส์แสดงได้ดังภาพที่ 5.2



ภาพที่ 5.2 แสดงรูปคลื่นสัญญาณแรงดันจากการไฟฟ้าและกระแสโหลดที่มีฮาร์มอนิก

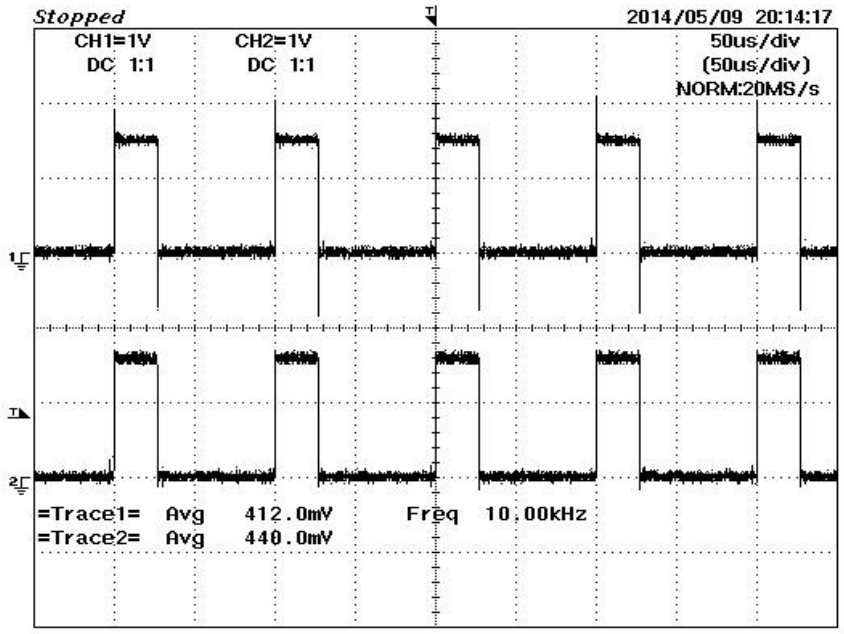
2. การทดสอบวงจรกำลัง

ในการทดสอบวงจรกำลังทำโดยการใช้แหล่งจ่ายแรงดันคงที่ เพื่อทดสอบการทำงานของวงจรกำลัง โหลดที่ใช้ในการทดสอบใช้โหลดที่เป็นเชิงเส้น(ฮีตเตอร์) สำหรับวงจร Matlab และการตั้งค่าของอุปกรณ์จะอยู่ในส่วนของภาคผนวก ข.



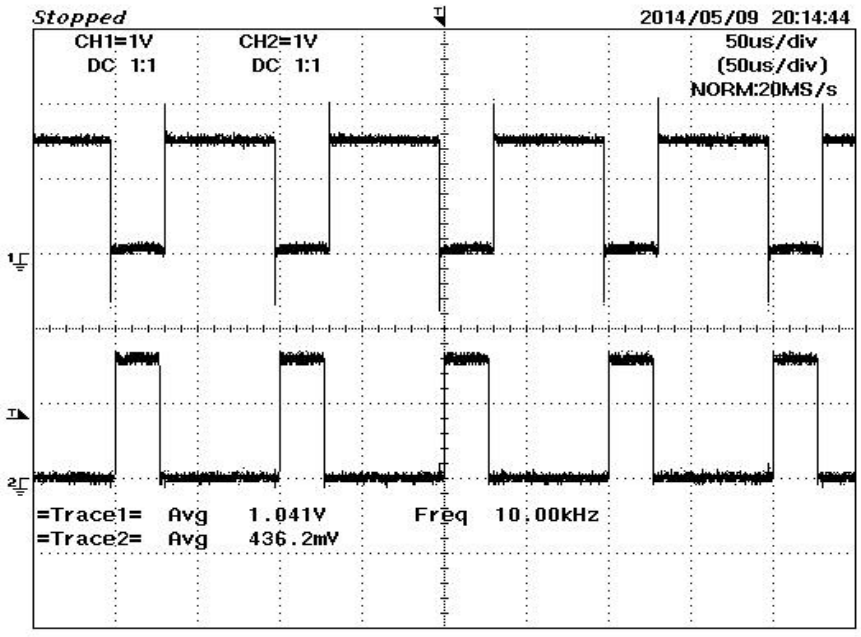
ภาพที่ 5.3 วงจรกำลังรับสัญญาณ PWM ภายในตัว C2000

ผลการทดลองสัญญาณพัลส์ที่ได้จาก IGBT ขั้วเกตกับขั้วอิมิตเตอร์ ตัวที่หนึ่งเทียบกับสัญญาณพัลส์ที่ได้จากไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองจะเหมือนกับตัวที่สี่ ดังภาพที่ 5.4 สัญญาณด้านบนจะสัญญาณของ IGBT สัญญาณด้านล่างจะเป็นสัญญาณจากไมโครคอนโทรลเลอร์



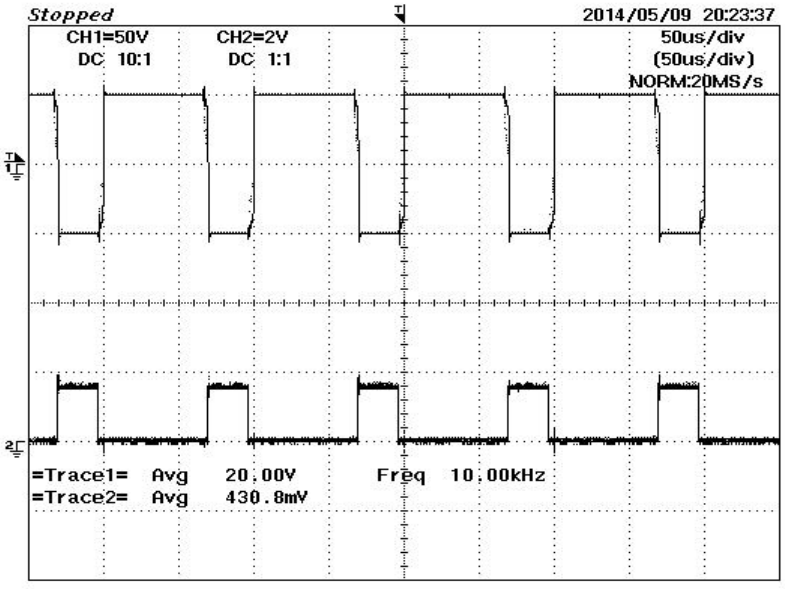
ภาพที่ 5.4 แสดงสัญญาณพัลส์ของ IGBT ตัวที่หนึ่งและตัวที่สี่

เมื่อทำการทดลองต่อเนื่องโดยอ้างอิงสัญญาณจากไมโครคอนโทรลเลอร์ดังภาพที่ 5.4 ผลการทดลองสัญญาณพัลส์ที่ได้จาก IGBT ขั้วเกตกับขั้วอิมิตเตอร์ ตัวที่สองเทียบกับสัญญาณพัลส์ที่ได้จากไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองจะเหมือนกับตัวที่สี่ ดังภาพที่ 5.5 สัญญาณด้านบนจะสัญญาณของ IGBT สัญญาณด้านล่างจะเป็นสัญญาณจากไมโครคอนโทรลเลอร์



ภาพที่ 5.5 แสดงสัญญาณพัลส์ของ IGBT ตัวที่สองและตัวที่สาม

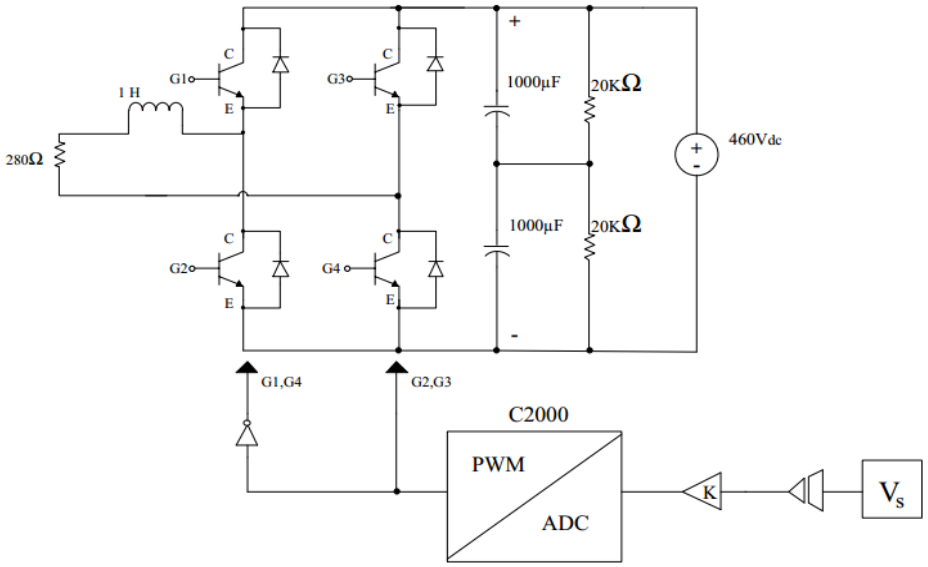
เมื่อทำการทดลองต่อเนื่องโดยอ้างอิงสัญญาณจากไมโครคอนโทรลเลอร์ดังภาพที่ 5.4 ผลการทดลองสัญญาณเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์ต่อกับโหลดเป็นเชิงเส้น(ฮีตเตอร์) ความต้านทาน 120Ω ที่แรงดันกระแสตรง 60 Vdc เทียบกับสัญญาณพัลส์ที่ได้จากไมโครคอนโทรลเลอร์



ภาพที่ 5.6 สัญญาณเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์ต่อกับโหลดเป็นเชิงเส้น

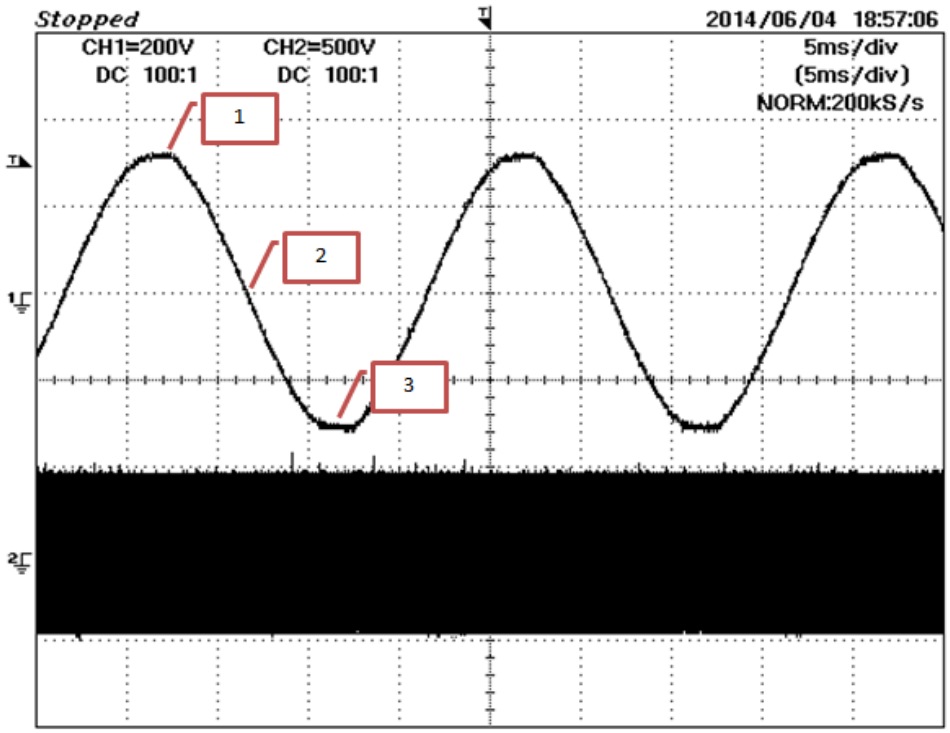
3. การควบคุมอินเวอร์เตอร์แบบไบโพลาร์

ในการควบคุมแบบไบโพลาร์จากภาพที่ 5.7 วงจรกำลังรับสัญญาณ PWM อ้างอิงสัญญาณแรงดันระบบจะนำสัญญาณแรงดันระบบทำการแบ่งแรงดันผ่านตัวตรวจจับแรงดัน (ISO124) แล้วนำสัญญาณเข้าสู่ไมโครคอนโทรลเลอร์ C2000 เพื่อป้อนให้กับกล่อง PWM ใน C2000 จะได้สัญญาณควบคุมอินเวอร์เตอร์สองสัญญาณเพื่อจ่ายไปยังชุดขับ IGBT เพื่อจ่ายแรงดันให้กับโหลดความต้านทานต่ออนุกรมกับโหลดเหนี่ยวนำ ซึ่งใช้แรงดันกระแสตรงที่ 460 Vdc ผลสัญญาณเอาท์พุทที่ได้จะได้ตามภาพที่ 5.8,5.9,5.10และ5.11 ตามลำดับ



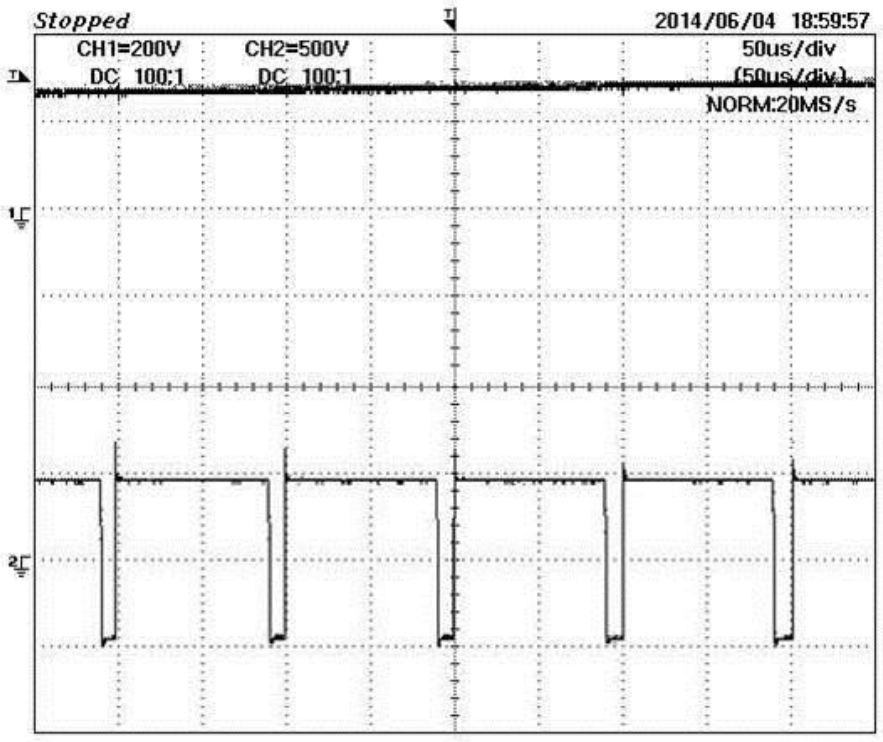
ภาพที่ 5.7 วงจรกำลังรับสัญญาณ PWM อ้างอิงสัญญาณแรงดันระบบ

จากภาพที่ 5.8 สัญญาณแรงดันเทียบกับเอาท์พุทอินเวอร์เตอร์ สัญญาณด้านบนจะเป็นสัญญาณจากระบบสัญญาณด้านล่างจะเป็นสัญญาณเอาท์พุทอินเวอร์เตอร์ สัญญาณที่ได้จะไม่สามารถมองออกได้ว่าเป็นสัญญาณไบโพลาร์



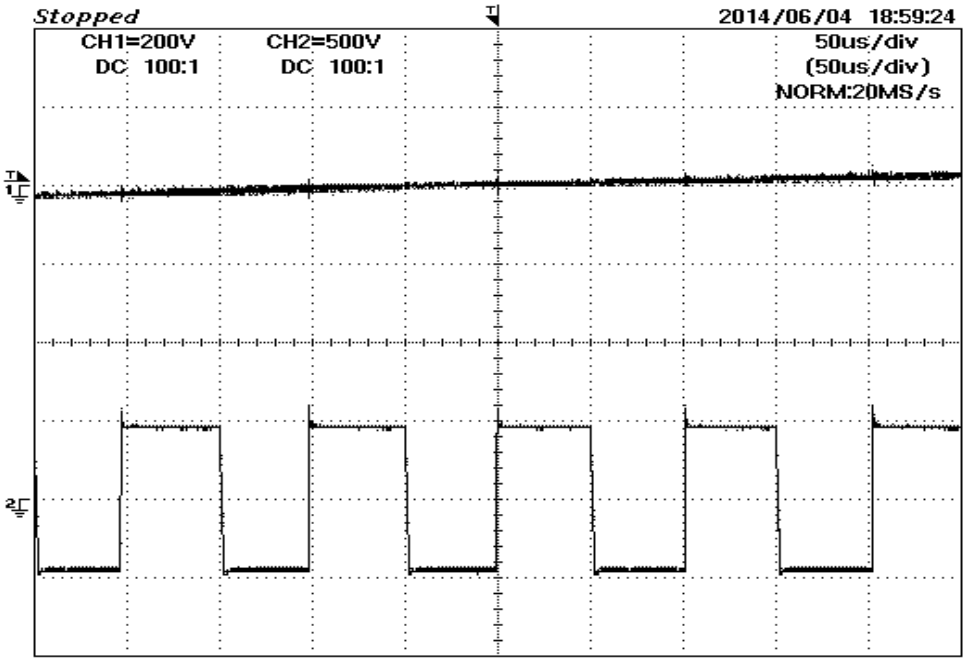
ภาพที่ 5.8 สัญญาณแรงดันเทียบกับเอาท์พุทอินเวอร์เตอร์

จากภาพที่ 5.8 เมื่อทำการขยายในจุดที่ 1 จะได้สัญญาณดังภาพที่ 5.9 ขอบสัญญาณแรงดันขอบบนเทียบกับเอาท์พุทอินเวอร์เตอร์ สัญญาณด้านบนจะเป็นขอบสัญญาณด้านบนของแรงดันระบบสัญญาณด้านล่างจะเป็นสัญญาณเอาท์พุทอินเวอร์เตอร์ สัญญาณที่ได้เป็นสัญญาณแบบไบโพลาร์จะเห็นได้ว่าขอบบนของสัญญาณซีกบวกจะกว้างกว่าสัญญาณซีกลบ



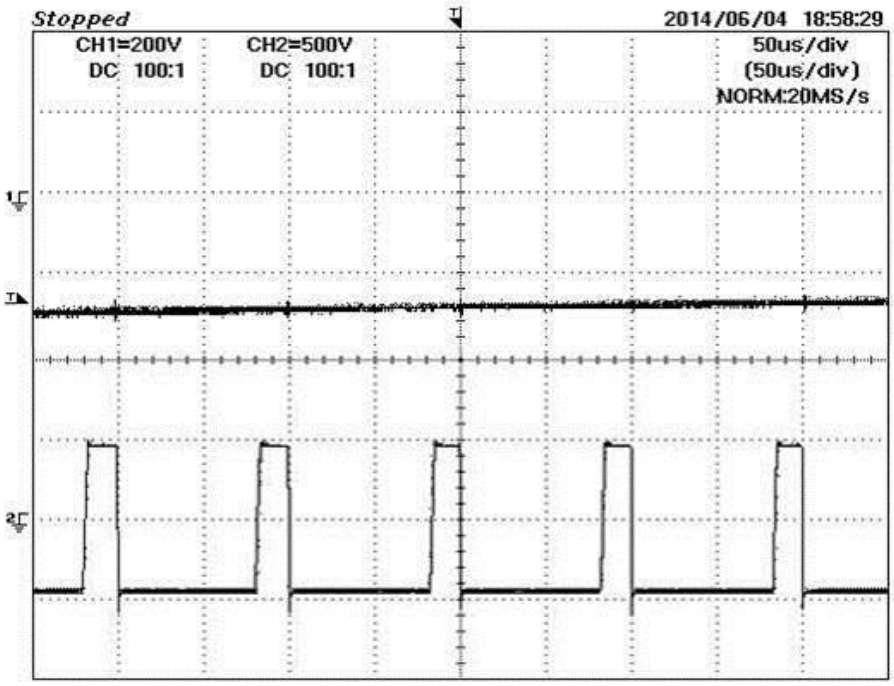
ภาพที่ 5.9 ขอบสัญญาณแรงดันขอบบนเทียบกับเอาท์พุทอินเวอร์เตอร์

จากภาพที่ 5.8 เมื่อทำการขยายในจุดที่ 2 จะได้สัญญาณดังภาพที่ 5.10 ขอบสัญญาณแรงดันที่ศูนย์เทียบกับเอาท์พุทอินเวอร์เตอร์ สัญญาณด้านบนจะเป็นสัญญาณจากระบบที่ศูนย์ สัญญาณด้านล่างจะเป็นสัญญาณเอาท์พุทอินเวอร์เตอร์ สัญญาณที่ได้เป็นสัญญาณแบบไบโพลาร์จะเห็นได้ว่าขอบบนของสัญญาณซีกบวกกับสัญญาณซีกลบจะแบ่งเท่ากัน



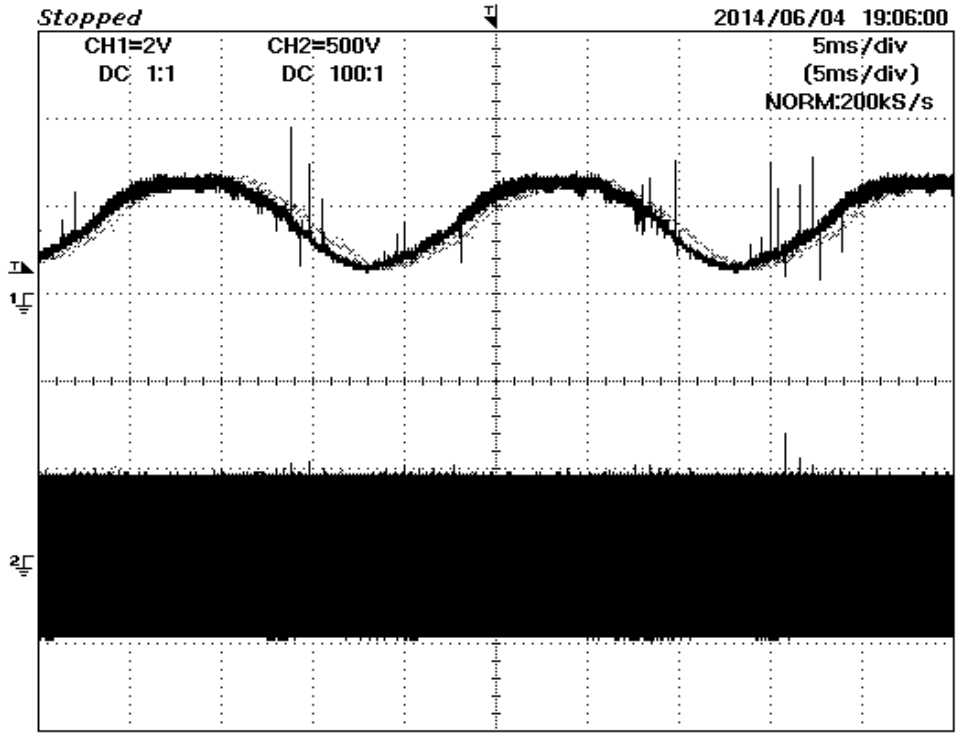
ภาพที่ 5.10 ขอบสัญญาณแรงดันที่ศูนย์เทียบกับเอาท์พุทอินเวอร์เตอร์

จากภาพที่ 5.8 เมื่อทำการขยายในจุดที่ 3 จะได้สัญญาณดังภาพที่ 5.11 ขอบสัญญาณแรงดันขอบล่างเทียบกับเอาท์พุทอินเวอร์เตอร์ สัญญาณด้านบนจะเป็นสัญญาณจากระบบที่ติดขอบล่าง สัญญาณด้านล่างจะเป็นสัญญาณเอาท์พุทอินเวอร์เตอร์ สัญญาณที่ได้เป็นสัญญาณแบบไบโพลาร์จะเห็นได้ว่าขอบบนของสัญญาณซีกบวกจะเล็กกว่าสัญญาณซีกลบ



ภาพที่ 5.11 ขอบสัญญาณแรงดันขอบล่างเทียบกับเอาท์พุทอินเวอร์เตอร์

จากการควบคุมแบบไบโพลาร์จากภาพที่ 5.7 วงจรกำลังรับสัญญาณ PWM อ้างอิงสัญญาณแรงดันระบบ ทำการวัดสัญญาณกระแสหน้าโหลดความต้านทานต่ออนุกรมกับโหลดเหนี่ยวนำ โดยผ่านวงจรตรวจจับกระแสที่มีการยกระดับออฟเซตของสัญญาณไปที่ 1.5 โวลต์ จะได้สัญญาณที่เป็นคลื่นไซน์ดังรูปสัญญาณด้านบน ภาพที่ 5.12



ภาพที่ 5.12 สัญญาณกระแสโหลด RL ผ่านวงจรตรวจจับกระแส

บทที่ 6

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการสร้างและทดสอบอุปกรณ์อินเวอร์เตอร์จ่ายแรงดันควบคุมด้วยกระแสสำหรับตัวกรองแบบแอคทีฟเพื่อพัฒนาตัวกรองกำลังชนิดแอคทีฟด้วยเทคนิคพีดับเบิลยูเอ็มในการแก้ปัญหาคลื่นของกระแสที่เพี้ยนไปจากรูปไซน์ ได้ทำการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK สร้างแบบจำลองวงจรกำลังแอคทีฟฟิลเตอร์ต่อขนานกับโหลดไม่เป็นเชิงเส้น เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนา และสร้างแบบจำลองวงจรอินเวอร์เตอร์จ่ายแรงดันควบคุมด้วยกระแสสำหรับตัวกรองแบบแอคทีฟเพื่อความเข้าใจในส่วนต่างๆ และลดความผิดพลาดที่อาจจะเกิดในการทดสอบระบบจริง โดยมีการทดสอบสอบกับโหลดความต้านทานอนุกรมกับโหลดความเหนี่ยวนำซึ่งจากผลการทดสอบสามารถสรุปและมีข้อเสนอแนะดังนี้

6.1 สรุปผลการทดลอง

1. ผลที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK วิธีการคำนวณกระแสอ้างอิงในการควบคุมการทำงานของระบบที่ได้นำเสนอมีหลักการที่ง่ายไม่ยุ่งยากซับซ้อนและให้ผลที่ถูกต้อง

2. ผลที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ให้ผลสอดคล้องกับผลการทดสอบระบบจริง

3. จากผลการทดสอบการทำงานของระบบ ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าระบบสามารถควบคุมการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าไปโหลดได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในกรณีที่มีโหลดความต้านทานต่ออนุกรมกับโหลดเหนี่ยวนำ

6.2 ข้อเสนอแนะในการพัฒนาต่อไป

1. เนื่องการวิธีการคำนวณหากระแสฮาร์มอนิกที่ใช้ในโครงงานนี้เป็นวิธีการอย่างง่ายแต่การตอบสนองของระบบต่อการเปลี่ยนแปลงของโหลดยังทำได้ช้า ในการพัฒนาต่อไปควรเปลี่ยน

วิธีการคำนวณหากระแสฮาร์มอนิกที่มีผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของโหลดได้เร็วและแม่นยำกว่านี้

2. ควรออกแบบวงจรควบคุมให้มีเสถียรภาพที่ดีเพื่อป้องกันปัญหาสัญญาณรบกวนกับวงจรควบคุมและวงจรตรวจจับสัญญาณต่างๆ

3. จากการควบคุมการทำงานของระบบที่ใช้วิธีการควบคุมกระแสแบบฮีสเตอรีซีส ซึ่งการควบคุมกระแสด้วยวิธีนี้มีความถี่สวิตซ์ไม่คงที่ อาจจะเกินความเสียหายกับอุปกรณ์ในระบบได้ถ้าความถี่สวิตซ์สูงเกินพิกัดของตัวอุปกรณ์ ดังนั้นควรมีการควบคุมกระแสแบบความถี่

4. เนื่องจากการทดสอบจริงมีความยุ่งยากและซับซ้อนหลายขั้นตอน จึงควรแบ่งเวลาให้เหมาะสมในการศึกษาและทดลองในส่วนต่างๆ ของระบบ

เอกสารอ้างอิง

[1] http://www02.abb.com/global/thabb/thabb501.nsf/bf177942f19f4a98c1257148003b7a0a/3d72cf85385e448bc1256fa200275eb4/$FILE/Power+Quality+newsletter+7.pdf ,2544

[2] http://203.158.6.11:8080/ sutir/bitstream/123456789/3855/1/ fulltext. pdf,2552

[3] http://sutir.sut.ac.th:8080/sutir/bitstream/123456789/3768/2/Fulltext.pdf,2553

[4] http://www.wpi.edu/Pubs/E-project/Available/E-project-042507-092653/unrestricted/MQP_D_1_2.pdf,2550

[5] http://www.gits.kmutnb.ac.th/ethesis/data/isbn9741908679.pdf,2549

[6] http://www.gits.kmutnb.ac.th/ethesis/data/4710181035.pdf,2549

[7] http://www.ee.eng.cmu.ac.th/~akachai/EDCAS-I-2013/EDCAS-I-008.pdf,2556

[8] http://hallencodersensorbme3.blogspot.com/2011/07/hall-sensor.html,2554

ภาคผนวก ก

การปรับตั้งค่า โปรแกรม Matlap

ภาคผนวก ข

ข้อมูล Data Sheet เกี่ยวกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์