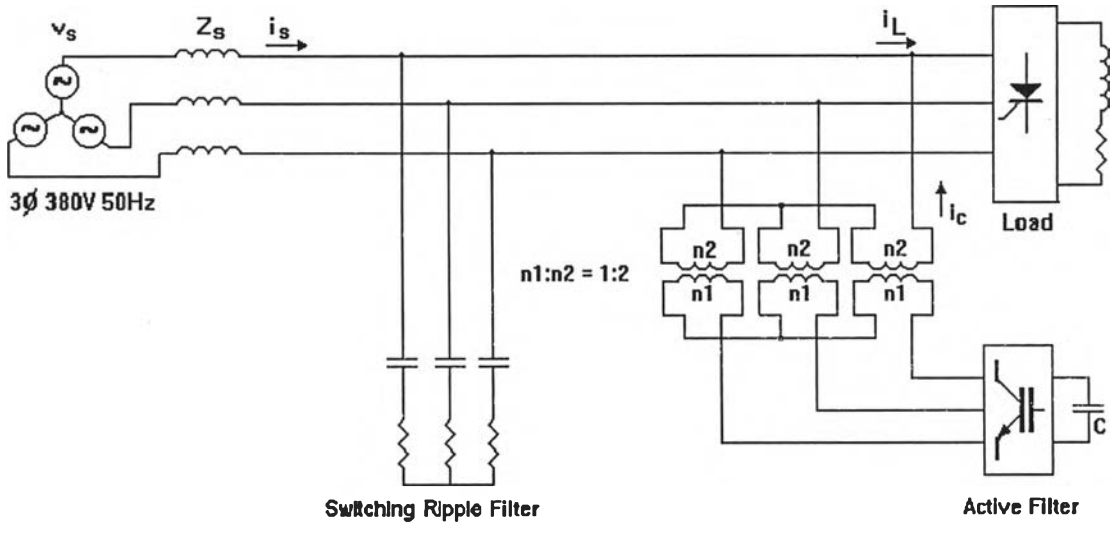
บทที่ 5

โครงสร้างฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ของระบบ

ในบทนี้จะกล่าวถึงลักษณะโครงสร้างทางด้านฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ของระบบ สำหรับโครงสร้างโดยรวมของระบบสามารถที่จะแสดงได้ดังรูปที่ 5.1 วงจรกรองกำลังแอกทีฟและวงจรกรองพาสซีฟ R-C สำหรับกรองระลอกคลื่นการสวิตช์จะต่อขนานอยู่ระหว่างแหล่งจ่ายและโหลด ในส่วนของวงจรกรองกำลังแอกทีฟเราจะอาศัยค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลของหม้อแปลงแรงดันเฟสเดียว 3 ตัวเป็นอิมพีแดนซ์เชื่อมต่อกับระบบกำลังของการไฟฟ้า อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันในวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ใช้ในการสร้างกระแสชดเชยตามที่คำนวณได้จะเป็นอินเวอร์เตอร์ชนิดที่ไม่ต้องใช้ส่วนป้อนแรงดันไฟตรง (สรรค์ธิพงษ์ โฆษิตเกษม, 2540)



รูปที่ 5.1 โครงสร้างของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน

5.1 ฮาร์ดแวร์ของอินเวอร์เตอร์

ในส่วนฮาร์ดแวร์ของอินเวอร์เตอร์จะประกอบไปด้วย

1. ภาคกำลัง ในส่วนนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ

   1.1 แหล่งจ่ายไฟตรง ประกอบไปด้วย

   - แหล่งจ่ายไฟตรงสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์แบบบอร์ดเดียว
   - แหล่งจ่ายไฟตรงสำหรับวงจรแปลงสัญญาณดิจิตัลเป็นแอนะลอก

- แหล่งจ่ายไฟตรงสำหรับส่วนควบคุมกระแสแบบฮีสเตอริซีส

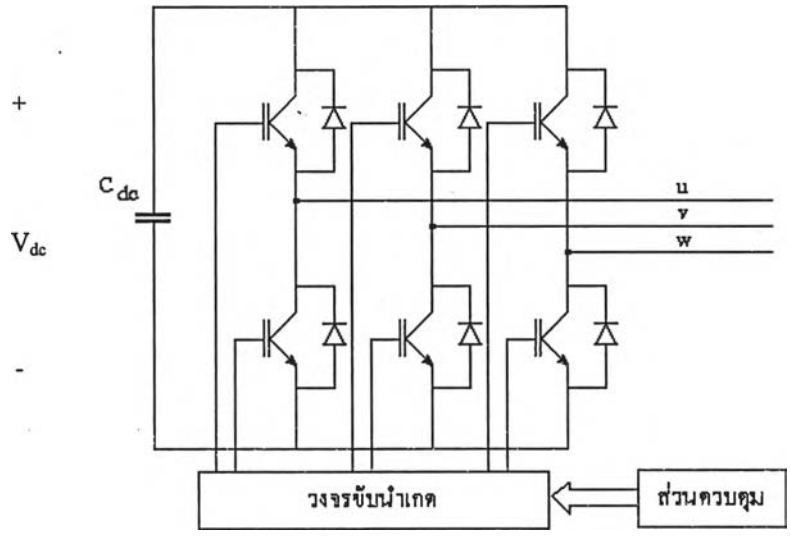
- แหล่งจ่ายไฟตรงสำหรับส่วนขับนำเกต

- แหล่งจ่ายไฟตรงสำหรับส่วนตรวจจับสัญญาณต่าง ๆ

1.2 ภาคกำลังด้านออก จะประกอบไปด้วย

- ชุดขับนำเกตของ IGBT 6 ชุด ซึ่ง 3 ชุดบนจะใช้แหล่งจ่ายแยกกัน และ 3 ชุดล่างจะใช้แหล่งจ่ายชุดเดียวกัน

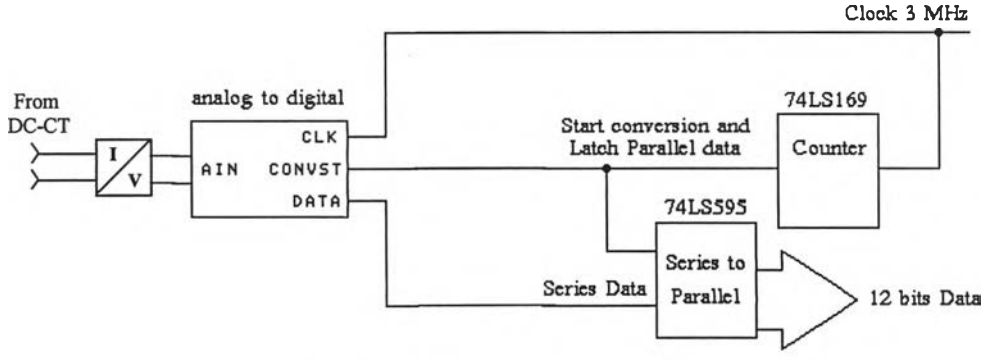
- ชุดสวิตช์กำลัง 6 ตัว ซึ่งจะใช้ IGBT module แบบ 1 กิ่ง(2 ตัวบน-ล่าง) 3 ตัว โดยรูปแบบการจัดวางอุปกรณ์สวิตช์กำลังสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 รูปแบบการจัดวางอุปกรณ์สวิตช์กำลังของอินเวอร์เตอร์

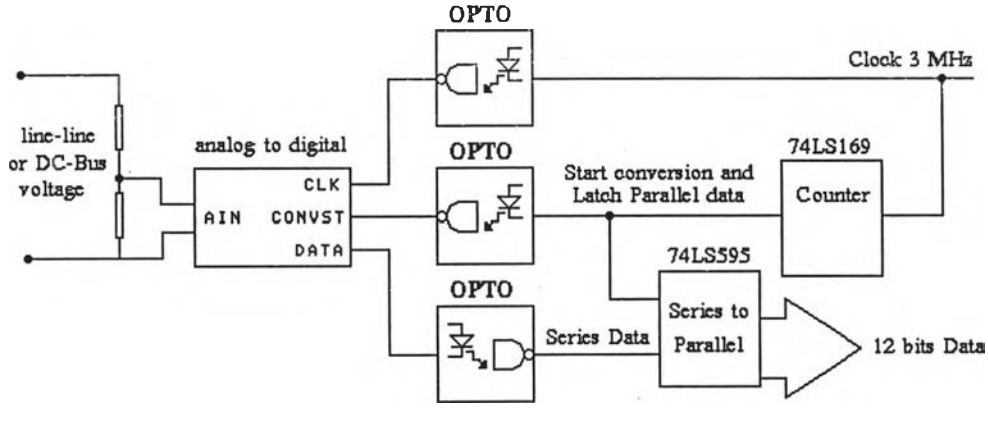
2. ภาคการตรวจจับสัญญาณต่าง ๆ จะประกอบไปด้วย

2.1 ส่วนตรวจจับสัญญาณกระแสเพื่อใช้คำนวณหาค่ากระแสฮาร์มอนิก สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.3 ชุดตรวจจับกระแสจะทำการวัดกระแสทางด้านแหล่งจ่ายของระบบกำลัง โดยใช้ตัวตรวจจับกระแสตรง (DC-CT) (ใช้ปรากฏการณ์ฮอลล์) จากนั้นนำค่ากระแสที่วัดได้มาแปลงเป็นสัญญาณแรงดันและผ่านเข้าสู่วงจรแปลงสัญญาณจากแอนะลอกเป็นดิจิตัลเพื่อส่งเข้าไมโครคอนโทรลเลอร์ต่อไป



รูปที่ 5.3 ส่วนตรวจจับสัญญาณกระแส

2.2 ส่วนตรวจจับแรงดันจากแหล่งจ่ายและแรงดันบัสไฟตรง ในส่วนนี้จะทำการรับค่าแรงดันจากแหล่งจ่ายหรือแรงดันบัสไฟตรง มาทำการทอนระดับแรงดันให้มีค่าระดับแรงดันที่ต่ำลง จากนั้นจะทำการแปลงค่าสัญญาณแอนะลอกไปอยู่ในรูปแบบของสัญญาณดิจิตัลแบบอนุกรม จากนั้นจะทำการแยกโดดทางไฟฟ้าโดยใช้ opto isolator การที่สัญญาณข้อมูลดิจิตัลมีลักษณะเป็นแบบอนุกรมทำให้การแยกโดดทางไฟฟ้าสามารถทำได้โดยใช้จำนวน opto isolator น้อยกว่าข้อมูลดิจิตัลแบบขนาน ข้อมูลดิจิตัลแบบอนุกรมที่ส่งผ่านจะถูกนำมาแปลงเป็นข้อมูลดิจิตัลแบบขนานเพื่อส่งเข้าไมโครคอนโทรลเลอร์ต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 5.4



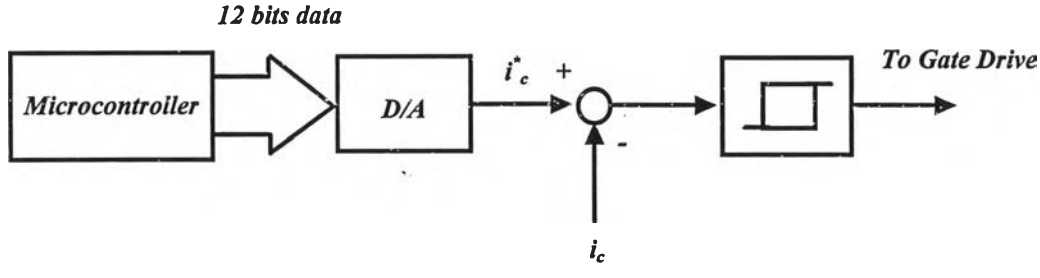
รูปที่ 5.4 ส่วนตรวจจับแรงดันจากแหล่งจ่ายและแรงดันบัสไฟตรง

3. ภาคการควบคุม ในส่วนนี้จะประกอบไปด้วย

- ไมโครคอนโทรลเลอร์แบบบอร์ดเดียว 1 บอร์ด
- วงจรแปลงสัญญาณดิจิตัลเป็นแอนะลอก

- ส่วนควบคุมกระแสแบบฮีสเตอริซีส

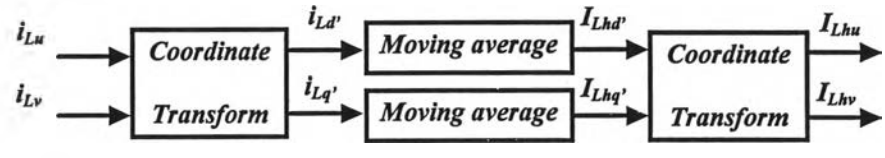
ฮาร์ดแวร์ของภาคการควบคุมสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.5 ในส่วนนี้จะเริ่มจากการคำนวณหาค่ากระแสที่ต้องการชดเชยโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ (ดูซอฟต์แวร์ที่ใช้คำนวณในหัวข้อ5.2) จากนั้นไมโครคอนโทรลเลอร์จะส่งสัญญาณกระแสที่ต้องการชดเชยซึ่งเป็นสัญญาณแบบดิจิตัลไปยังวงจรแปลงสัญญาณดิจิตัลเป็นแอนะลอก สัญญาณแอนะลอกที่ได้จะถูกส่งต่อไปยังส่วนควบคุมกระแสแบบฮีสเตอริซีสซึ่งจะทำการตรวจจับกระแสขาออกของอินเวอร์เตอร์ 2 เฟสมาทำการเปรียบเทียบเพื่อให้ได้สัญญาณควบคุมการตัดต่อสวิตช์ สัญญาณควบคุมดังกล่าวจะถูกส่งต่อไปยังส่วนขับนำเกตเพื่อควบคุมการตัดต่อของสวิตช์กำลังให้จ่ายกระแสชดเชยตามต้องการต่อไป



รูปที่ 5.5 ฮาร์ดแวร์ของภาคการควบคุมกระแส

5.2 ซอฟต์แวร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

ส่วนของซอฟต์แวร์ที่ใช้คำนวณหาค่ากระแสฮาร์มอนิกในแต่ละอันดับที่ต้องการ สามารถแสดงเป็นบล็อกไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 บล็อกไดอะแกรมแสดงการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ในระบบวงจรกรองแอกทีฟในการคำนวณหาค่ากระแสฮาร์มอนิก

เมื่อ i_{Lu}, i_{Lv} คือกระแสโหลดบนแกนนิ่งเฟส u และ v ตามลำดับ

$i_{Ld'}$, $i_{Lq'}$ คือกระแสโหลดบนแกนหมุน d'-q' ของความถี่ฮาร์มอนิก

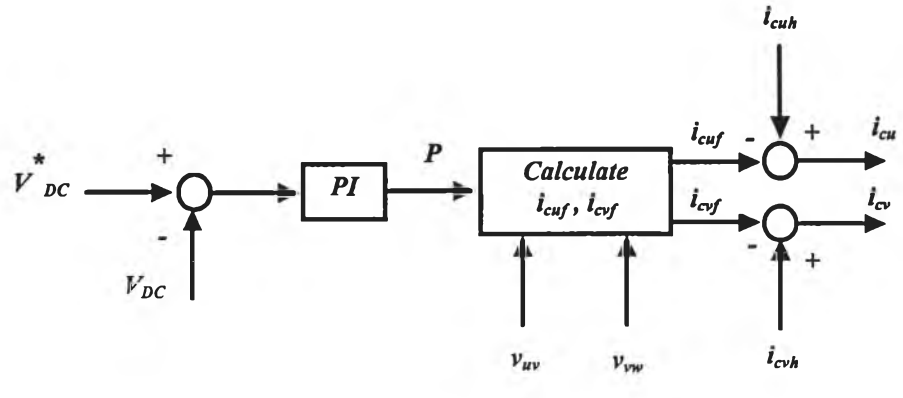
$I_{Lhd'}$, $I_{Lhq'}$ คือกระแสฮาร์มอนิกที่ต้องการตรวจจับบนแกนหมุน d'-q' ของความถี่ฮาร์มอนิก

I_{Lhu}, I_{Lhv} คือกระแสฮาร์มอนิกที่ต้องการตรวจจับบนแกนนิ่งเฟส u และ v ตามลำดับ

จากบล็อกไดอะแกรมสามารถอธิบายได้ว่าไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการอ่านค่ากระแสทางด้านโหลดจากส่วนตรวจจับสัญญาณกระแส (i_{Lu}, i_{Lv}) แล้วทำการแปลงค่าไปพิจารณาบนแกนอ้างอิงซึ่งหมุนไปด้วยความเร็วเท่ากับความถี่ของกระแสฮาร์มอนิกที่ต้องการจะตรวจจับ $(h\omega)$ $(i_{Ld'}, i_{Lq'})$ จากนั้นจะคำนวณหาค่าองค์ประกอบฮาร์มอนิก $(I_{Lhd'}, I_{Lhq'})$ โดยอาศัย Moving Average Filter และเมื่อเราทำการแปลงค่ากลับมาพิจารณาบนแกนอ้างอิงในระบบ 3 เฟสก็จะได้กระแสฮาร์มอนิก (I_{Lhu}, I_{Lhv}) ตามที่ต้องการ

ในกรณีกำจัดฮาร์มอนิกอันดับเดียว กระแสฮาร์มอนิกที่ได้ก็จะเป็นกระแสชดเชยสำหรับกำจัดฮาร์มอนิกโดยตรง (i_{cuh}, i_{cvh}) ส่วนในกรณีที่กำจัดฮาร์มอนิกหลายอันดับ เราจะทำการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกให้ครบทุกอันดับก่อน จากนั้นจึงนำกระแสฮาร์มอนิกทุกอันดับที่ต้องการกำจัดมารวมกันเป็นคำสั่งกระแสชดเชย และในกรณีที่กำจัดฮาร์มอนิกทุกอันดับ เราจะต้องตรวจจับกระแสความถี่มูลฐานแทน จากนั้นจึงนำไปลบออกจากกระแสโหลดก็จะได้กระแสที่เหลือเป็นกระแสฮาร์มอนิก สำหรับใช้เป็นค่ากระแสชดเชยฮาร์มอนิกตามต้องการ

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่าอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ จะเป็นอินเวอร์เตอร์ชนิดที่ไม่ต้องใช้ส่วนป้อนแรงดันไฟตรง ดังนั้นจึงต้องมีส่วนการคำนวณหาค่ากระแสชดเชยสำหรับควบคุมแรงดันบัสไฟตรงดังแสดงตามรูปที่ 5.7 โดยไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการอ่านค่าแรงดันบัสไฟตรงจากส่วนตรวจจับแรงดัน (V_{DC}) และนำมาผ่านส่วนควบคุม PI เพื่อคำนวณหาค่ากำลังงานจริง (P) สำหรับรักษาระดับแรงดันไฟตรงให้มีค่าคงที่ จากค่ากำลังงานที่ได้และค่าแรงดันจากแหล่งจ่ายที่ตรวจจับเข้ามา (v_{uv}, v_{vw}) จะสามารถคำนวณหาค่ากระแสชดเชยสำหรับควบคุมแรงดันบัสไฟตรง (i_{cuf}, i_{cvf}) ได้ เมื่อนำกระแสชดเชยทั้งสองส่วนมารวมเข้าด้วยกันก็จะได้ค่ากระแสชดเชยรวมที่ต้องส่งให้กับวงจรแปลงสัญญาณดิจิตัลเป็นแอนะลอกและส่วนควบคุมกระแสแบบฮีสเตอริซิสต่อไป



รูปที่ 5.7 บล็อกไดอะแกรมแสดงการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ในระบบวงจรกรองแอกทีฟ ในการคำนวณหาค่ากระแสควบคุมแรงดันบัสไฟตรง

เมื่อ V^{*}_{DC} คือคำสั่งแรงดันบัสไฟตรง

v_{uv} , v_{vw} คือแรงดันสายระหว่างเฟส u-v และ v-w ตามลำดับ

i_{cuf} , i_{cvf} คือกระแสชดเชยสำหรับควบคุมแรงดันบัสไฟตรง

i_{cuh} , i_{cvh} คือกระแสชดเชยสำหรับกำจัดฮาร์มอนิก

i_{cu} , i_{cv} คือกระแสชดเชยรวม

ซอฟต์แวร์ทั้งหมดสามารถเขียนแสดงเป็น PDL (Program Development Language) และแสดงไดอะแกรมเวลากรณีใช้ Recursive DFT แบบเต็มคาบได้ดังต่อไปนี้ (กรณีใช้ Recursive DFT แบบ 1/6 คาบจะใช้เวลาเพิ่มขึ้นประมาณ 0.5 ไมโครวินาทีสำหรับจัดการดัชนีของบัฟเฟอร์ข้อมูลแบบ 1/6 คาบ)

1. การชดเชยฮาร์มอนิกอันดับเดียว

ซอฟต์แวร์โมดูลนี้จะใช้การอินเทอรัปต์ทุกๆ 55.6 ไมโครวินาที และโปรแกรมในการบริการอินเทอรัปต์จะใช้เวลาทั้งหมดประมาณ 35.5 ไมโครวินาที

****

A SHUNT ACTIVE POWER FILTER WITH HARMONIC DETECTION

USING RECURSIVE DFT ELIMINATE 1 ORDER

****

MODULE : RECURSIVE DFT

Initialize

Initialize all variable

Initialize all timers and enable timer interupt

Loop here and wait for interupt only

Switching Frequency Interupt Service Routine

Read load current (i_{Lu} , i_{Lv})

Input i_{Lu} , i_{Lv} from external A/D

Find harmonic component using recursive DFT

Convert to rotating d'-q' axis ($i_{Ld'}$, $i_{Lq'}$)

Moving average

Convert to stationary u-v axis (I_{Lhu} , I_{Lhv})

Calculate compensating current for harmonic suppression (i_{cuh} , i_{cvh})

$i_{cuh} = I_{Lhu}$

$i_{cvh} = I_{Lhv}$

Read DC bus voltage (V_{DC})

Input V_{DC} from external A/D

Read source voltage (v_{uv} , v_{vw})

Input v_{uv} , v_{vw} from external A/D

PI controller to control DC bus voltage

Calculate voltage error

Calculate PI output (P)

Calculate compensating current for DC bus control (i_{cuf} , i_{cvf})

Calculate compensating current (i_{cu} , i_{cv})

$i_{cu} = i_{cuh} - i_{cuf}$

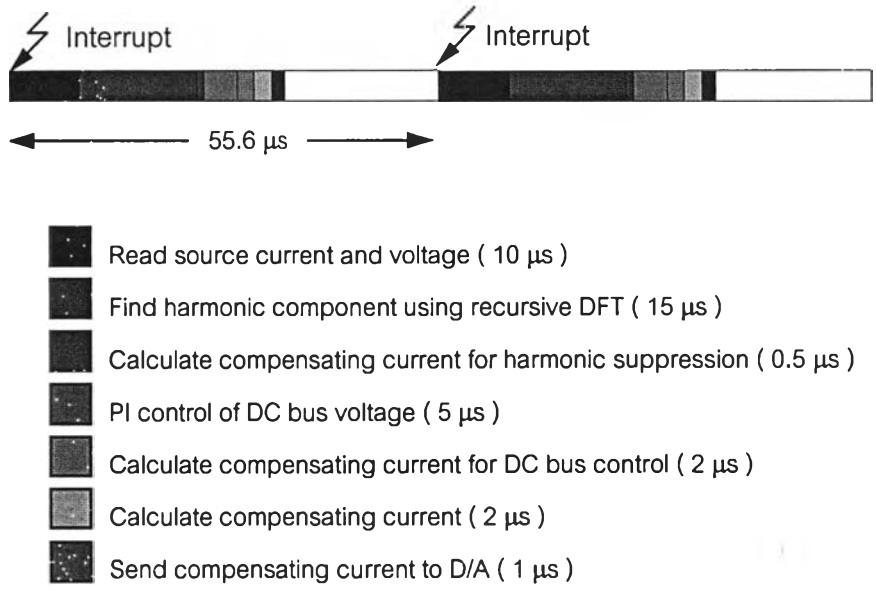
$i_{cv} = i_{cvh} - i_{cvf}$

Send compensating current to D/A

Return

END RECURSIVE DFT

****



รูปที่ 5.8 ไดอะแกรมเวลาของซอฟต์แวร์กรณีกำจัดกระแสฮาร์มอนิก 1 อันดับ

2. การชดเชยฮาร์มอนิกทุกอันดับ

ซอฟต์แวร์โมดูลนี้จะใช้การอินเทอรัปต์ทุกๆ 55.6 ไมโครวินาที และโปรแกรมในการบริการอินเทอรัปต์จะใช้เวลาทั้งหมดประมาณ 36ไมโครวินาที

```
**************************************************************************
```

A SHUNT ACTIVE POWER FILTER WITH HARMONIC DETECTION

USING RECURSIVE DFT ELIMINATE ALL ORDERS

```
**************************************************************************
```

MODULE : RECURSIVE DFT

Initialize

Initialize all variable

Initialize all timers and enable timer interupt

Loop here and wait for interupt only

Switching Frequency Interupt Service Routine

Read load current (i_{Lu} , i_{Lv})

Input i_{Lu} , i_{Lv} from external A/D

Find 1st order component using recursive DFT

Convert to rotating d-q axis (i_{Ld} , i_{Lq})

Moving average

Convert to stationary u-v axis (I_{L1u} , I_{L1v})

Calculate compensating current for harmonic suppression (i_{cuh} , i_{cvh})

$i_{cuh} = i_{Lu} - I_{L1u}$

$i_{cvh} = i_{Lv} - I_{L1v}$

Read DC bus voltage (V_{DC})

Input V_{DC} from external A/D

Read source voltage (v_{uv} , v_{vw})

Input v_{uv} , v_{vw} from external A/D

PI controller to control DC bus voltage

Calculate voltage error

Calculate PI output (P)

Calculate compensating current for DC bus control (i_{cuf} , i_{cvf})

Calculate compensating current (i_{cu} , i_{cv})

$i_{cu} = i_{cuh} - i_{cuf}$

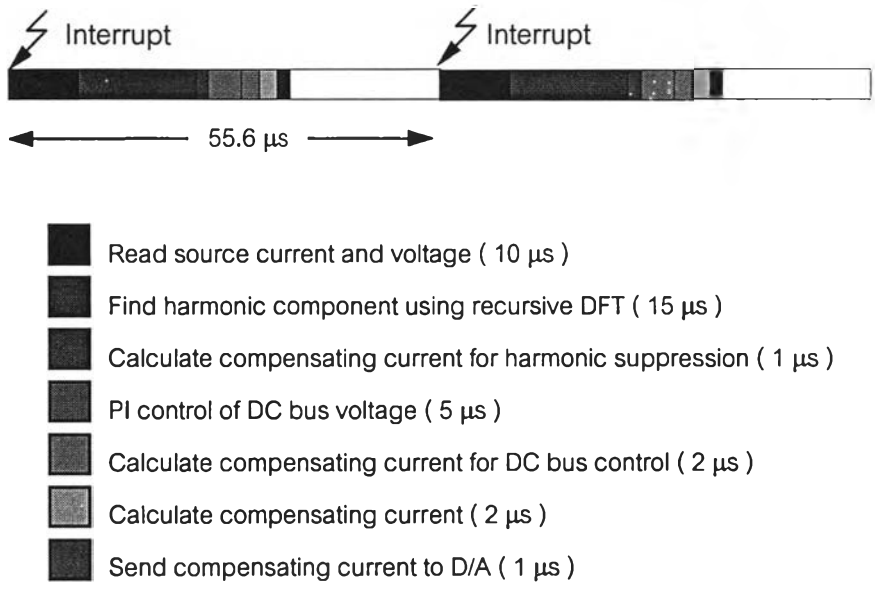
$i_{cv} = i_{cvh} - i_{cvf}$

Send compensating current to D/A

Return

END RECURSIVE DFT

****



รูปที่ 5.9 ไดอะแกรมเวลาของซอฟต์แวร์กรณีกำจัดกระแสฮาร์มอนิกทุกอันดับ

3. การชดเชยฮาร์มอนิก 2 อันดับ

ซอฟต์แวร์โมดูลนี้จะใช้การอินเทอรัปต์ทุกๆ 81.3 ไมโครวินาที และโปรแกรมในการบริการอินเทอรัปต์จะใช้เวลาทั้งหมดประมาณ 51.5 ไมโครวินาที

```
**********************************************************************************
```

A SHUNT ACTIVE POWER FILTER WITH HARMONIC DETECTION

USING RECURSIVE DFT ELIMINATE 2 ORDERS

```
**********************************************************************************
```

MODULE : RECURSIVE DFT

Initialize

Initialize all variable

Initialize all timers and enable timer interupt

Loop here and wait for interupt only

Switching Frequency Interupt Service Routine

Read load current (i_{Lu} , i_{Lv})

Input i_{Lu} , i_{Lv} from external A/D

Find 1st component of harmonic using recursive DFT

Convert to rotating d'1-q'1 axis ($i_{Ld'1}$, $i_{Lq'1}$)

Moving average

Convert to stationary u-v axis (I_{Lh1u} , I_{Lh1v})

Find 2nd component of harmonic using recursive DFT

Convert to rotating d'2-q'2 axis ($i_{Ld'2}$, $i_{Lq'2}$)

Moving average

Convert to stationary u-v axis (I_{Lh2u} , I_{Lh2v})

Calculate compensating current for harmonic suppression (i_{cuh} , i_{cvh})

$i_{cuh} = I_{Lh1u} + I_{Lh2u}$

$i_{cvh} = I_{Lh1v} + I_{Lh2v}$

Read DC bus voltage (V_{DC})

Input V_{DC} from external A/D

Read source voltage (v_{uv} , v_{vw})

Input v_{uv} , v_{vw} from external A/D

PI controller to control DC bus voltage

Calculate voltage error

Calculate PI output (P)

Calculate compensating current for DC bus control (i_{cuf} , i_{cvf})

Calculate compensating current (i_{cu} , i_{cv})

$i_{cu} = i_{cuh} - i_{cuf}$

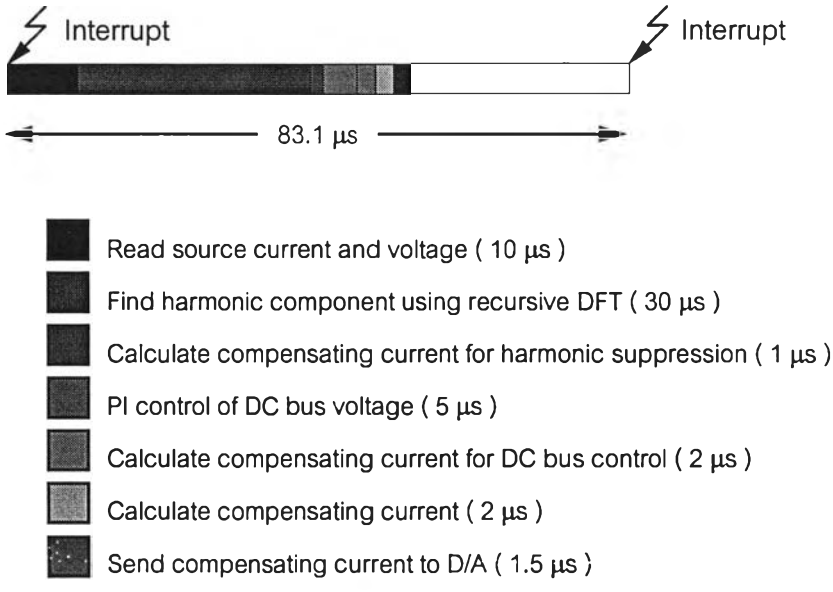
$i_{cv} = i_{cvh} - i_{cvf}$

Send compensating current to D/A

Return

END RECURSIVE DFT

****



รูปที่ 5.10 ไดอะแกรมเวลาของซอฟต์แวร์กรณีกำจัดกระแสฮาร์มอนิก 2 อันดับ

4. การชดเชยฮาร์มอนิก 4 อันดับ

ซอฟต์แวร์โมดูลนี้จะใช้การอินเทอรัปต์ทุกๆ 196.1 ไมโครวินาที และโปรแกรมในการบริการอินเทอรัปต์จะใช้เวลาทั้งหมดประมาณ 83 ไมโครวินาที

```
**************************************************************************
```

A SHUNT ACTIVE POWER FILTER WITH HARMONIC DETECTION

USING RECURSIVE DFT ELIMINATE 4 ORDERS

```
**************************************************************************
```

MODULE : RECURSIVE DFT

Initialize

Initialize all variable

Initialize all timers and enable timer interupt

Loop here and wait for interupt only

Switching Frequency Interupt Service Routine

Read load current (i_{Lu} , i_{Lv})

Input i_{Lu} , i_{Lv} from external A/D

Find 1st component of harmonic using recursive DFT

Convert to rotating d'1-q'1 axis ($i_{Ld'1}$, $i_{Lq'1}$)

Moving average

Convert to stationary u-v axis (I_{Lh1u} , I_{Lh1v})

Find 2nd component of harmonic using recursive DFT

Convert to rotating d'2-q'2 axis ($i_{Ld'2}$, $i_{Lq'2}$)

Moving average

Convert to stationary u-v axis (I_{Lh2u} , I_{Lh2v})

Find 3rd component of harmonic using recursive DFT

Convert to rotating d'3-q'3 axis ($i_{Ld'3}$, $i_{Lq'3}$)

Moving average

Convert to stationary u-v axis (I_{Lh3u} , I_{Lh3v})

Find 4th component of harmonic using recursive DFT

Convert to rotating d'4-q'4 axis ($i_{Ld'4}$, $i_{Lq'4}$)

Moving average

Convert to stationary u-v axis (I_{Lh4u} , I_{Lh4v})

Calculate compensating current for harmonic suppression (i_{cuh} , i_{cvh})

$i_{cuh} = I_{Lh1u} + I_{Lh2u} + I_{Lh3u} + I_{Lh4u}$

$i_{cvh} = I_{Lh1v} + I_{Lh2v} + I_{Lh3v} + I_{Lh4v}$

Read DC bus voltage (V_{DC})

Input V_{DC} from external A/D

Read source voltage (v_{uv} , v_{vw})

Input v_{uv} , v_{vw} from external A/D

PI controller to control DC bus voltage

Calculate voltage error

Calculate PI output (P)

Calculate compensating current for DC bus control (i_{cuf} , i_{cvf})

Calculate compensating current (i_{cu} , i_{cv})

$$i_{cu} = i_{cuh} - i_{cuf}$$

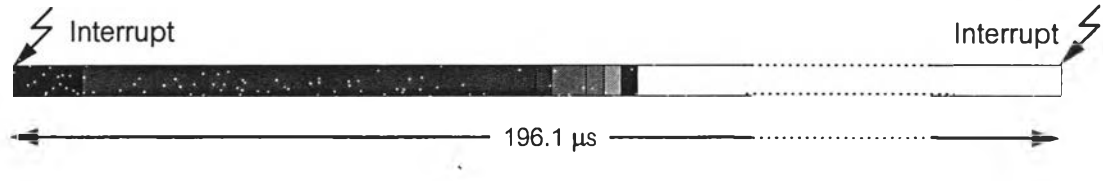
$$i_{cv} = i_{cvh} - i_{cvf}$$

Send compensating current to D/A

Return

END RECURSIVE DFT

****



- Read source current and voltage (10 μs)
- Find harmonic component using recursive DFT (60 μs)
- Calculate compensating current for harmonic suppression (2 μs)
- PI control of DC bus voltage (5 μs)
- Calculate compensating current for DC bus control (2 μs)
- Calculate compensating current (2 μs)
- Send compensating current to D/A (2 μs)

รูปที่ 5.11 ไดอะแกรมเวลาของซอฟต์แวร์กรณีกำจัดกระแสฮาร์มอนิก 4 อันดับ