

## บทที่ 4

การนำการตรวจจับกระแสมอนิกด้วย Recursive DFT มาใช้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

### 4.1 ลักษณะการตรวจจับกระแสของวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ใช้ Recursive DFT

วงจรกรองกำลังแอกทีฟโดยทั่วไปจะทำการตรวจจับกระแสเพื่อนำมาใช้คำนวณหาค่ากระแสมอนิกได้ใน 2 ลักษณะคือ

1. ตรวจจับกระแสทางด้านโหลด เมื่อโหลดมีคุณลักษณะเป็นแหล่งจ่ายกระแส ในกรณีนี้การทำงานของวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ได้จะมีลักษณะการทำงานแบบวงรอบเปิด
2. ตรวจจับกระแสด้านแหล่งจ่าย ในกรณีนี้วงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ได้จะมีลักษณะการทำงานแบบวงรอบปิด

ในวิทยานิพนธ์นี้จะนำ Recursive DFT มาใช้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ตรวจจับกระแสทางด้านโหลด ทั้งนี้เนื่องจากตัวตรวจจับกระแสมอนิกที่ใช้ Recursive DFT มีมีลักษณะเฟสที่ไม่ดีดังแสดงตามรูปที่ 3.3 และ 3.5 จึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้กับระบบที่มีลักษณะการทำงานแบบวงรอบเปิดเท่านั้น การนำตัวตรวจจับแบบนี้มาใช้กับระบบวงรอบปิดจะทำให้เกิดปัญหาด้านเสถียรภาพ ซึ่งยังคงต้องมีการแก้ไขต่อไป วงจรกรองกำลังแอกทีฟที่นำ Recursive DFT มาใช้ตรวจจับกระแสมอนิกทางด้านโหลด จะยังคงมีคุณสมบัติที่ดีของ Recursive DFT ครบทุกประการคือ

1. ผลตอบสภาวะชั่วครู่ที่รวดเร็ว
2. สามารถเลือกกำจัดเฉพาะกระแสมอนิกอันดับที่ต้องการได้ดี

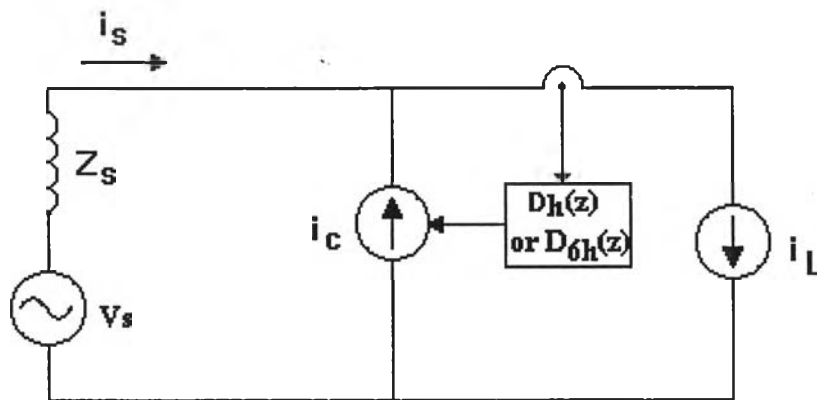
การตรวจจับกระแสมอนิกด้วย Recursive DFT สามารถประยุกต์ใช้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่เลือกกำจัดกระแสมอนิกเฉพาะอันดับได้ในหลายลักษณะรวมทั้งการกำจัดกระแสมอนิกทุกอันดับด้วย

### 4.2 โครงสร้างการทำงานของวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ใช้ Recursive DFT

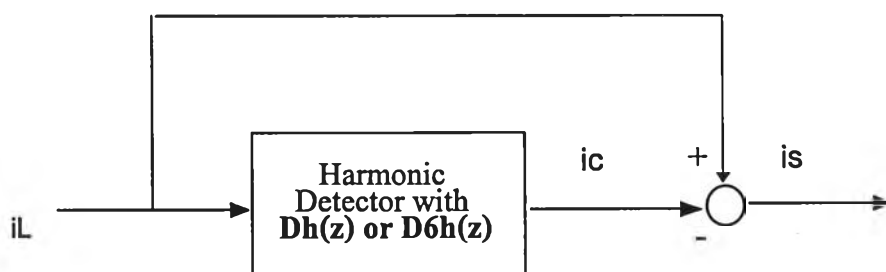
#### 4.2.1 วงจรกรองกำลังแอกทีฟที่กำจัดกระแสมอนิกเฉพาะบางอันดับ

วงจรกรองกำลังแอกทีฟในลักษณะนี้ จะทำการตรวจจับกระแสเข้ามาหาเพื่อค่ากระแสมอนิกที่ต้องการด้วยการทำ Recursive DFT โดยตรง ค่ากระแสมอนิกที่ได้จะถูกใช้เป็น

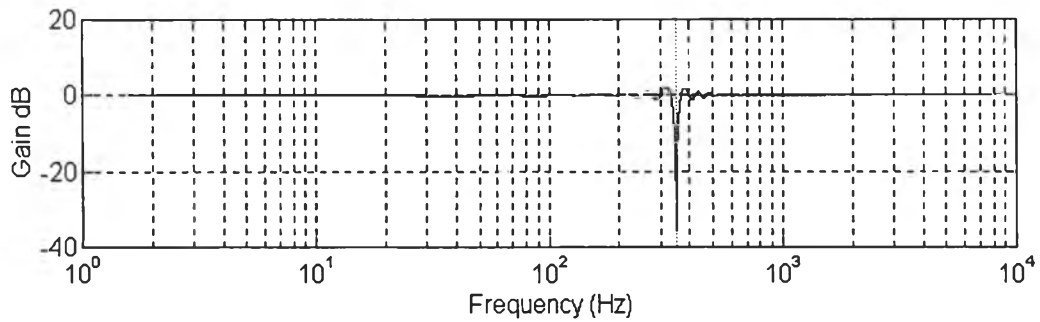
กระแสคำสั่งเพื่อสร้างจ่ายกลับเข้าไปหักล้างกับกระแสฮาร์โมนิกจากโหลด ดังแสดงวงจรสมมูลและบล็อกไดอะแกรมการทำงานในรูปที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ รูปที่ 4.3 แสดงตัวอย่างคุณสมบัติการกรองของวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ใช้ Recursive DFT เมื่อทำการเลือกกำจัดเฉพาะกระแสฮาร์โมนิกอันดับที่ 7 (350 Hz) จากรูปเราจะเห็นได้ว่าวงจรกรองกำลังแอกทีฟจะสามารถลดทอนกระแสฮาร์โมนิกเฉพาะอันดับที่ต้องการคือฮาร์โมนิกอันดับที่ 7 ได้อย่างดีโดยที่ฮาร์โมนิกอันดับอื่นๆจะมีค่าอัตราขยายของผลตอบเชิงความถี่ของการกำจัดเท่ากับ 1 นั่นคือวงจรกรองกำลังแอกทีฟจะไม่เปลี่ยนแปลงค่าของฮาร์โมนิกในอันดับเหล่านี้เลย เมื่อเราใช้การตรวจจับกระแสฮาร์โมนิกด้วย Recursive DFT แบบ 1/6 คาบเราก็จะได้วงจรกรองกำลังแอกทีฟที่มีลักษณะสมบัติการกรองตามต้องการเช่นกันดังแสดงเป็นตัวอย่างในรูปที่ 4.4



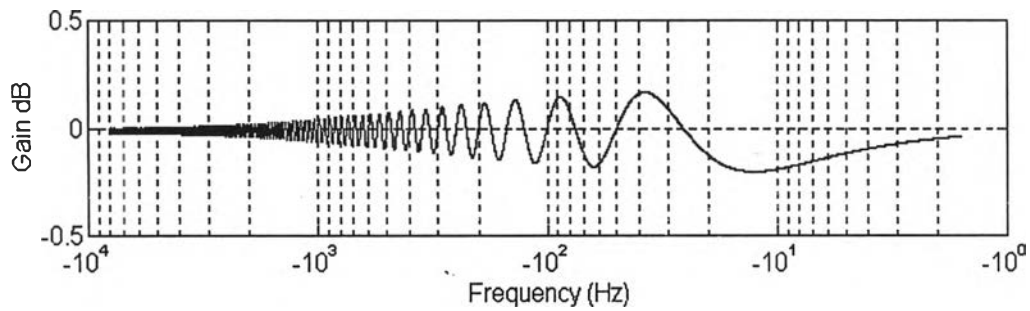
รูปที่ 4.1 วงจรสมมูลหนึ่งเฟสของวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ตรวจจับกระแสทางด้านโหลด



รูปที่ 4.2 บล็อกไดอะแกรมแสดงการทำงานของวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ตรวจจับกระแสทางด้านโหลด กรณีกำจัดกระแสฮาร์โมนิกอันดับเดียว

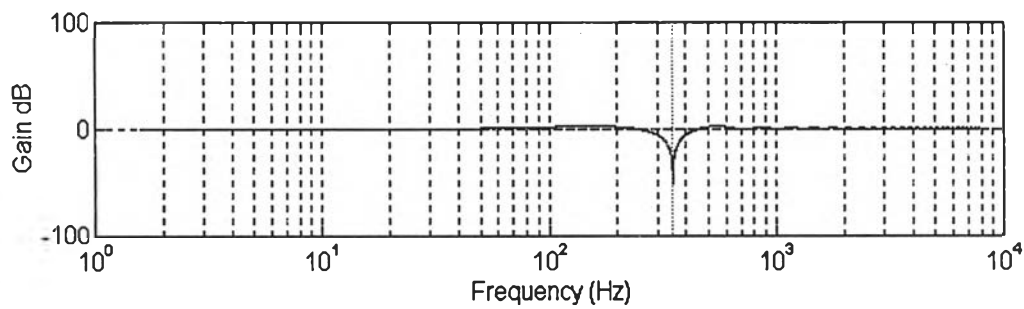


ก) อัตรายบายสำหรับ Positive sequence

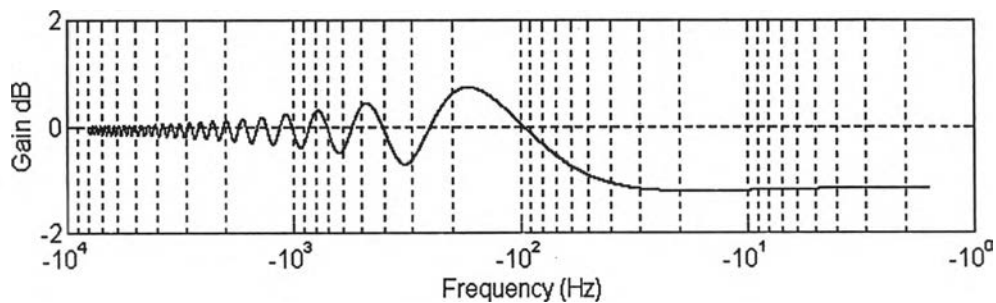


ข) อัตรายบายสำหรับ Negative sequence

รูปที่ 4.3 คุณสมบัติการกรองของวงจรกำลังแอกทีฟที่ใช้ Recursive DFT แบบเต็มคาบเมื่อกำจัดเฉพาะกระแสร่มอนิกอันดับที่ 7 ซีเวนซ์บวกละใช้  $N=360$



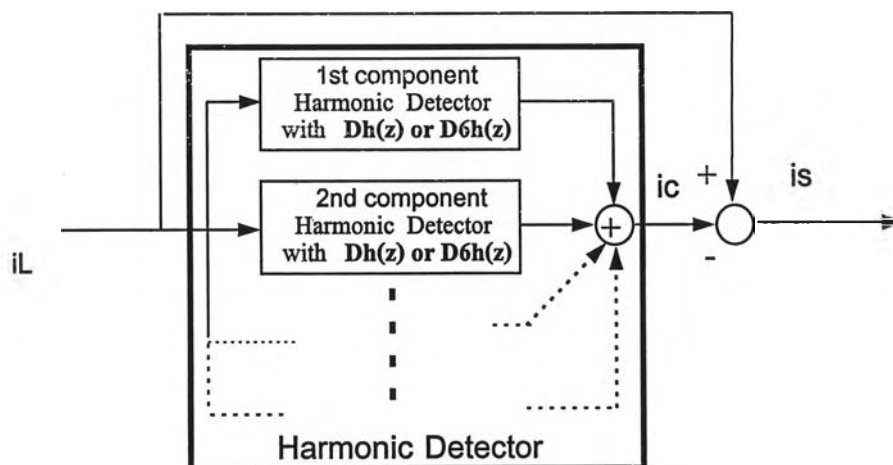
ก) อัตรายบายสำหรับ Positive sequence



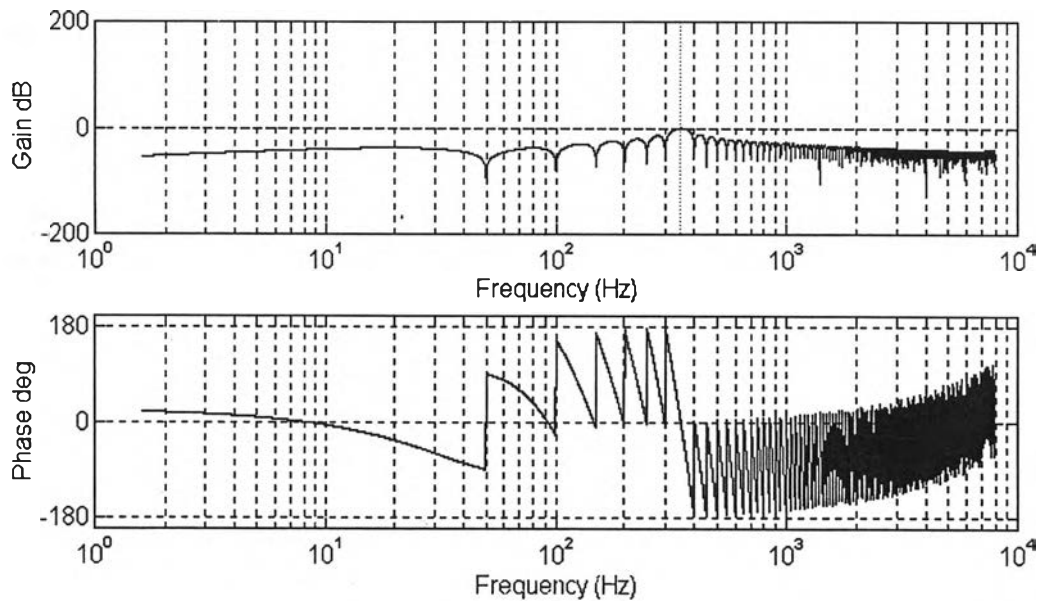
ข) อัตรายบายสำหรับ Negative sequence

รูปที่ 4.4 คุณสมบัติการกรองของวงจรกำลังแอกทีฟที่ใช้ Recursive DFT แบบ 1/6 คาบเมื่อกำจัดเฉพาะกระแสร่มอนิกอันดับที่ 7 ซีเวนซ์บวกละใช้  $N=360$

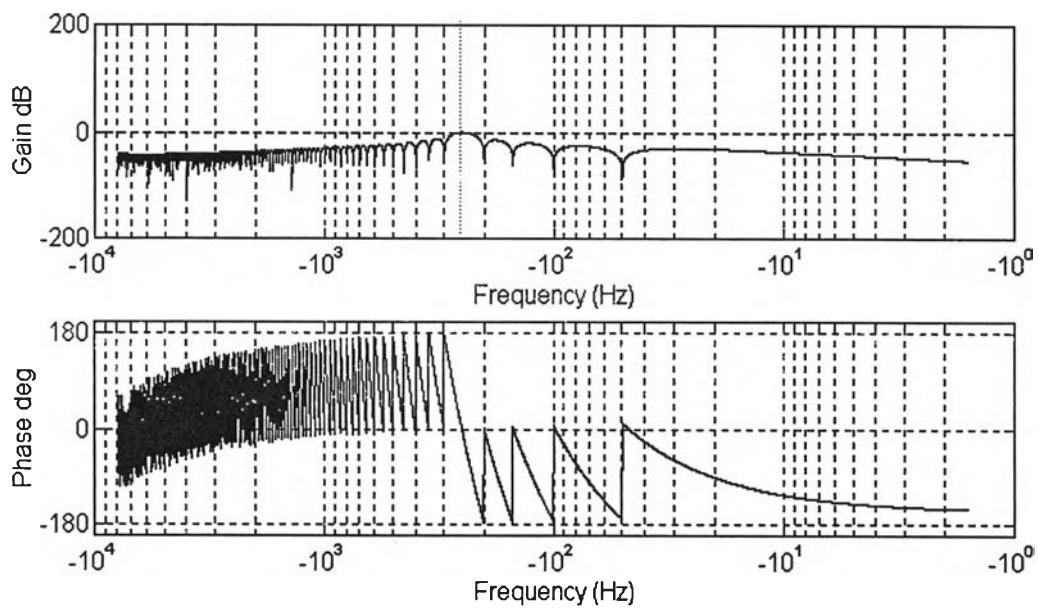
วงจรกรองในลักษณะนี้อาจทำการเลือกกำจัดกระแสฮาร์มอนิกที่หลายอันดับก็ได้โดยทำ Recursive DFT หาค่ากระแสฮาร์มอนิกในแต่ละอันดับที่ต้องการ แล้วนำกระแสฮาร์มอนิกทั้งหมดที่ต้องการกำจัดมาบวกกันดังแสดงหลักการเป็นบล็อกไดอะแกรมตามรูปที่ 4.5 รูปที่ 4.6 แสดงตัวอย่างลักษณะสมบัติการตรวจจับฮาร์มอนิกเมื่อใช้ Recursive DFT แบบเต็มคาบเมื่อทำการเลือกตรวจจับเฉพาะกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 และ 7 ซึ่งจะทำได้ลักษณะสมบัติการกรองของวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ใช้ตัวตรวจจับนี้แสดงดังรูปที่ 4.8 รูปที่ 4.7 แสดงตัวอย่างลักษณะสมบัติการตรวจจับฮาร์มอนิกที่ใช้ Recursive DFT แบบเต็มคาบเมื่อทำการเลือกตรวจจับเฉพาะกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 11 และ 13 ซึ่งจะทำได้ลักษณะสมบัติการกรองของวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ใช้ตัวตรวจจับนี้แสดงดังรูปที่ 4.9 วงจรกรองกำลังแอกทีฟทั้ง 2 แบบข้างต้นมีลักษณะสมบัติการกรองที่ดีตามต้องการ และเมื่อเราใช้การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วย Recursive DFT แบบ 1/6 คาบเราก็จะได้วงจรกรองกำลังแอกทีฟที่มีลักษณะสมบัติการกรองตามต้องการเช่นกัน ดังตัวอย่างลักษณะสมบัติการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกที่แสดงในรูปที่ 4.10 ในกรณีที่ตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 และ 7 และในรูปที่ 4.11 ในกรณีที่ตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 11 และ 13 คุณสมบัติการกรองของวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ใช้ตัวตรวจจับดังกล่าวแสดงในรูปที่ 4.12 และ 4.13 ตามลำดับ



รูปที่ 4.5 บล็อกไดอะแกรมแสดงการทำงานของวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ตรวจจับกระแสทางด้าน โหลด กรณีกำจัดกระแสฮาร์มอนิกหลายอันดับ

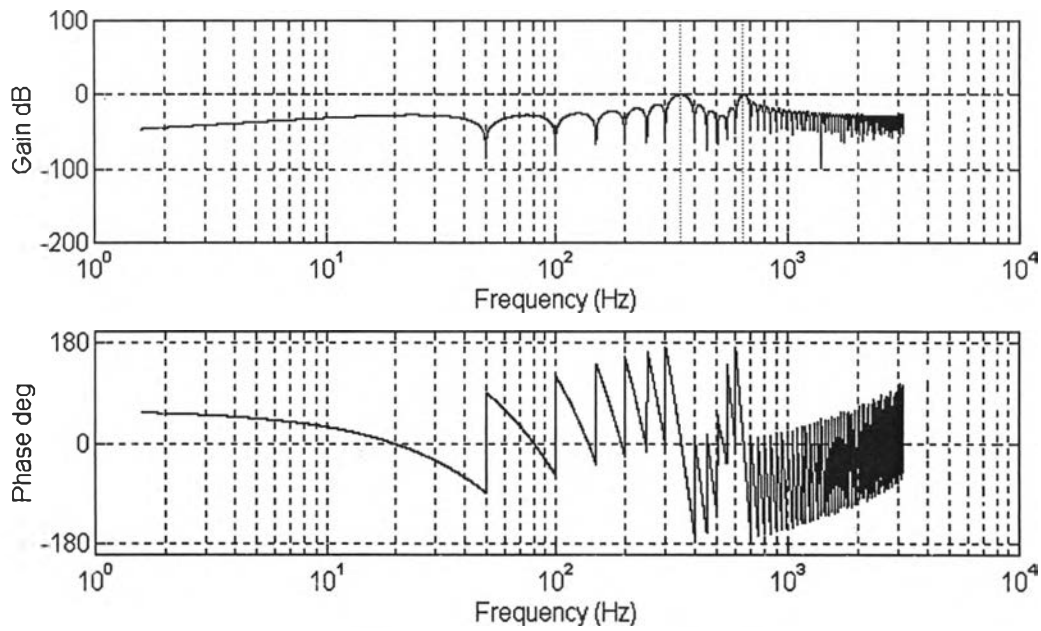


ก) อัตราขยายและเฟสสำหรับ Positive sequence

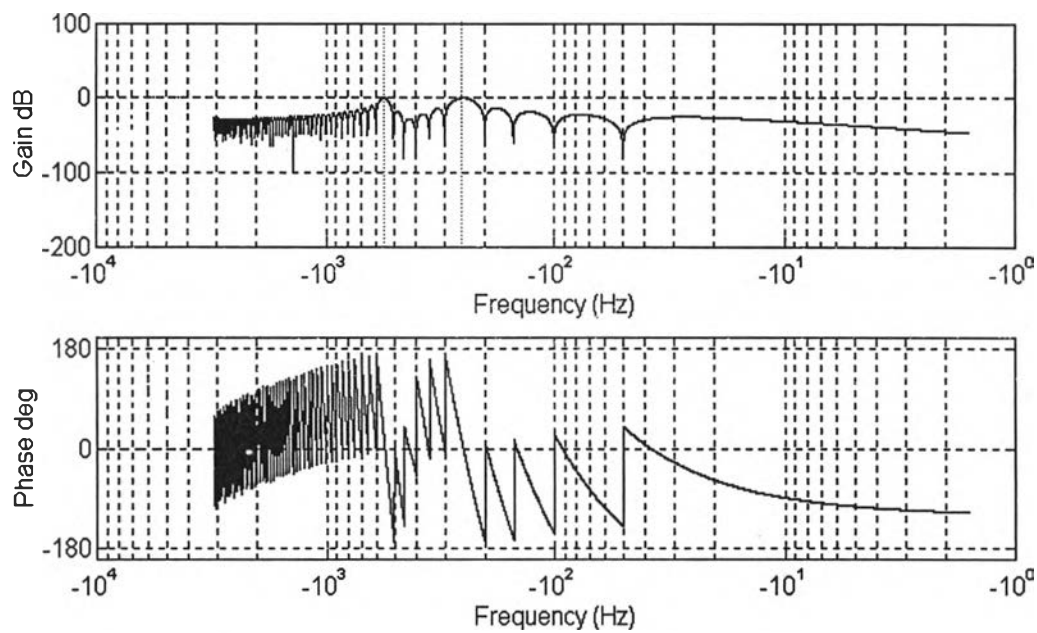


ข) อัตราขยายและเฟสสำหรับ Negative sequence

รูปที่ 4.6 ลักษณะสมบัติการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกเมื่อใช้ Recursive DFT แบบเต็มคาบตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 ซีควอนซ์ลบและ 7 ซีควอนซ์บวก โดยใช้  $N = 246$

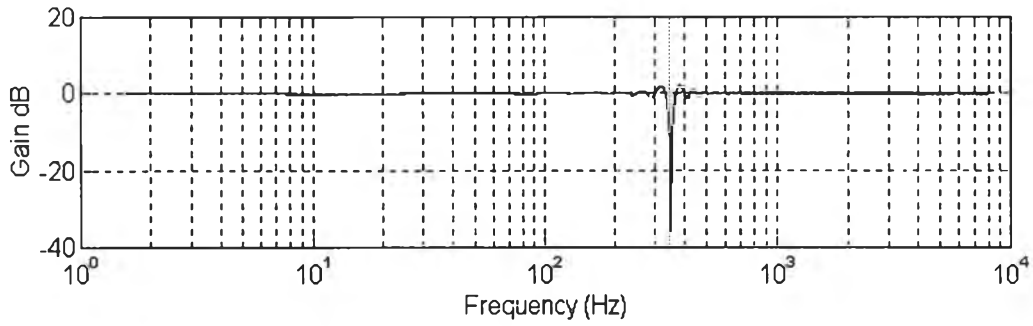


ก) อัตราขยายและเฟสสำหรับ Positive sequence

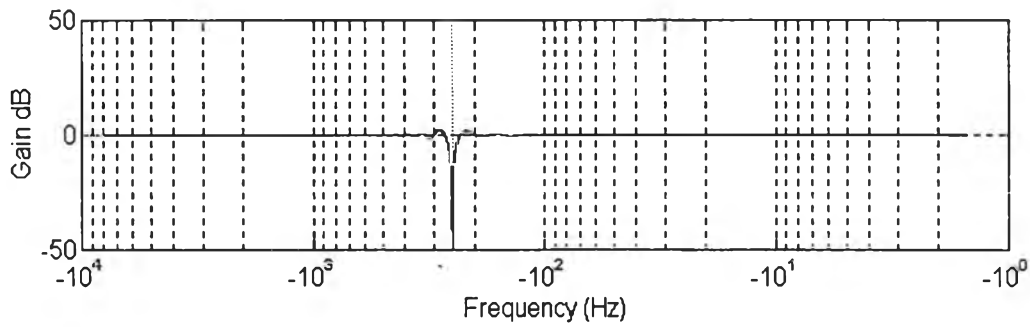


ข) อัตราขยายและเฟสสำหรับ Negative sequence

รูปที่ 4.7 ลักษณะสมบัติการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกเมื่อใช้ Recursive DFT แบบเต็มคาบตรวจ  
จับกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 11 ซีควอนซ์ลบและ 7 13 ซีควอนซ์บวก โดยใช้  $N = 102$

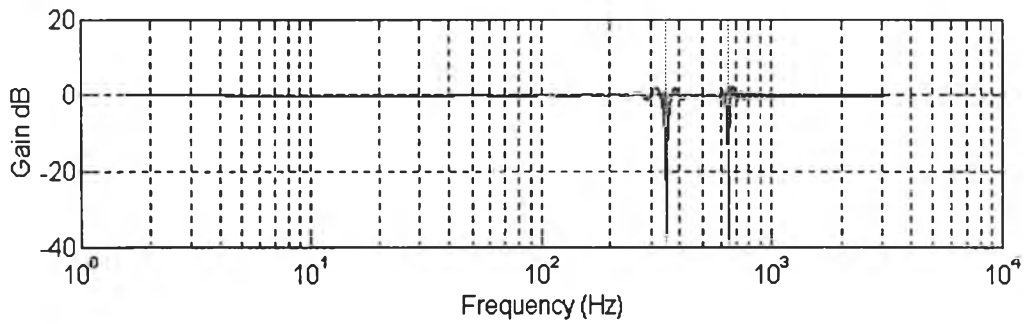


ก) อัตราขยายสำหรับ Positive sequence

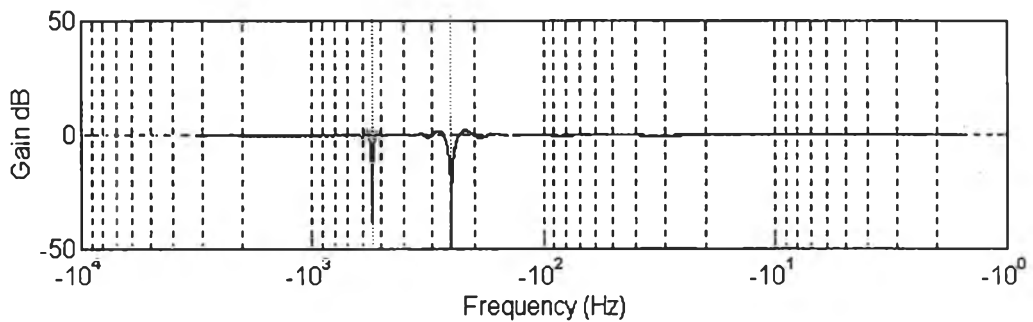


ข) อัตราขยายสำหรับ Negative sequence

รูปที่ 4.8 คุณสมบัติการกรองของวงจรกำลังแอกทีฟที่ใช้ Recursive DFT แบบเต็มคาบเมื่อกำจัดเฉพาะกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 ซีเควนซ์ลบและ 7 ซีเควนซ์บวกใช้ N= 246

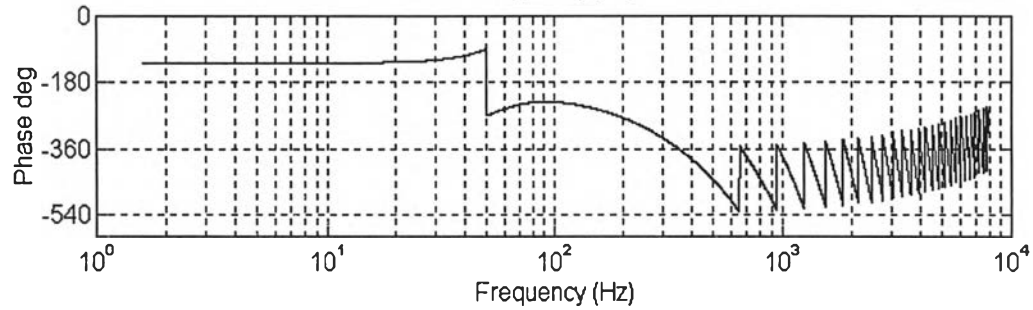
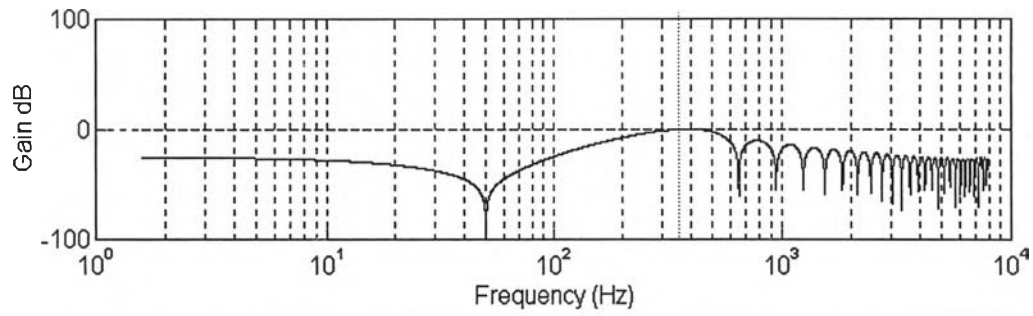


ก) อัตราขยายสำหรับ Positive sequence

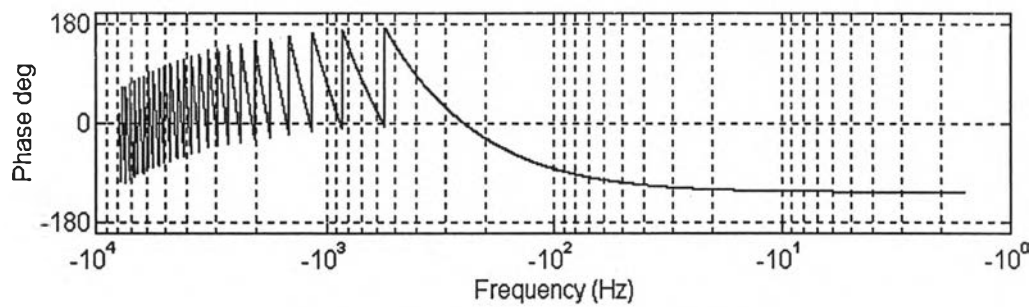
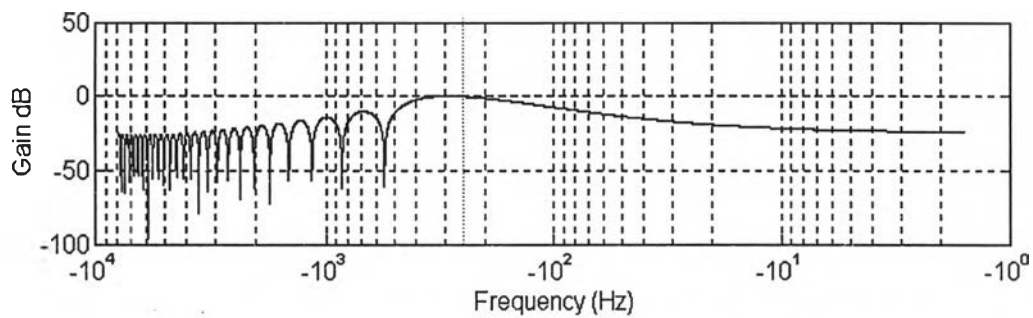


ข) อัตราขยายสำหรับ Negative sequence

รูปที่ 4.9 คุณสมบัติการกรองของวงจรกำลังแอกทีฟที่ใช้ Recursive DFT แบบเต็มคาบเมื่อกำจัดเฉพาะกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 11 ซีเควนซ์ลบและ 7 13 ซีเควนซ์บวกใช้ N= 102



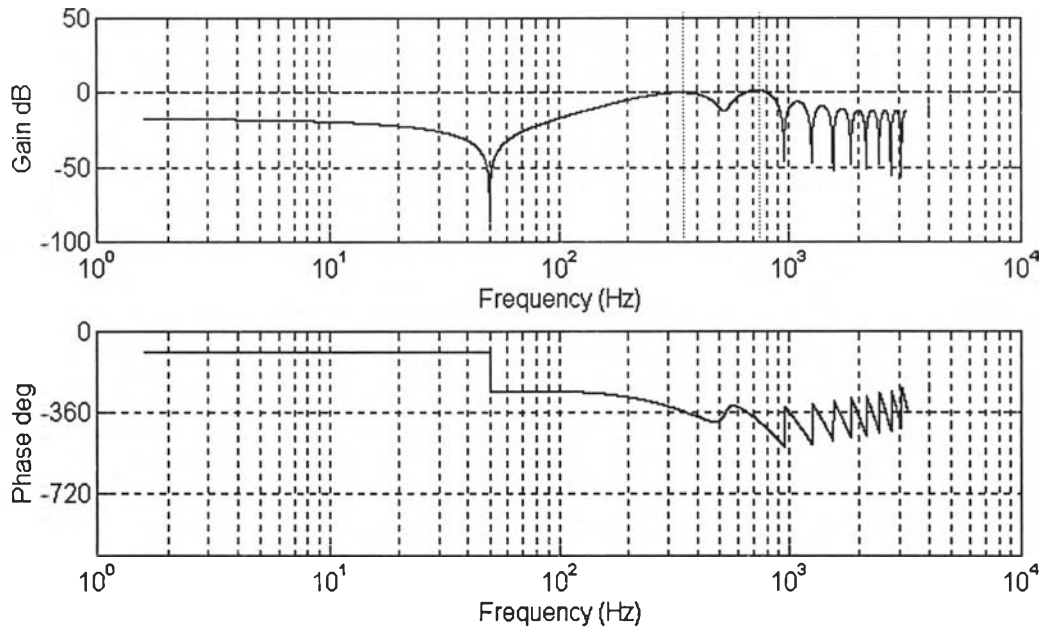
ก) อัตรายชายและเฟสสำหรับ Positive sequence



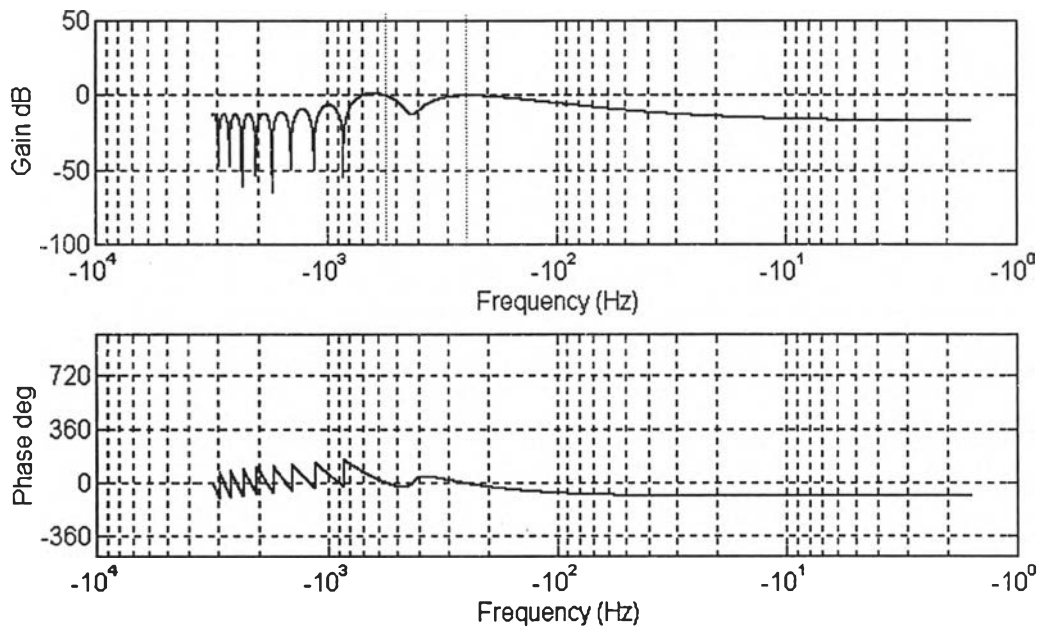
ข) อัตรายชายและเฟสสำหรับ Negative sequence

รูปที่ 4.10 ลักษณะสมบัติการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกเมื่อใช้ Recursive DFT แบบ 1/6 คาบตรวจ  
จับกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 ซีเควนซ์ลบและ 7 ซีเควนซ์บวก โดยใช้  $N = 246$



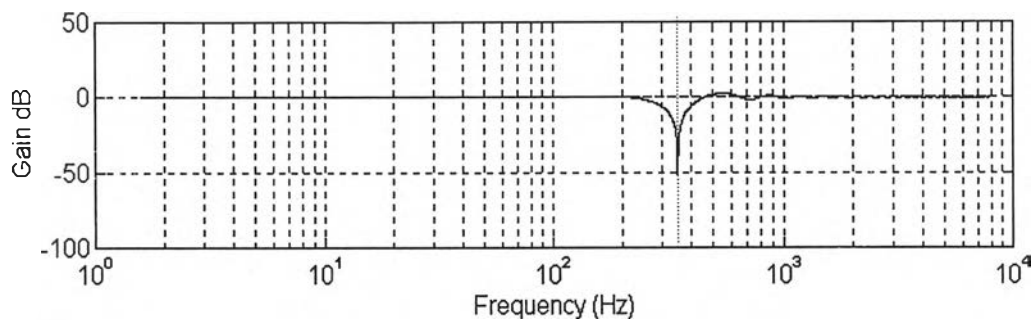


ก) อัตราขยายและเฟสสำหรับ Positive sequence

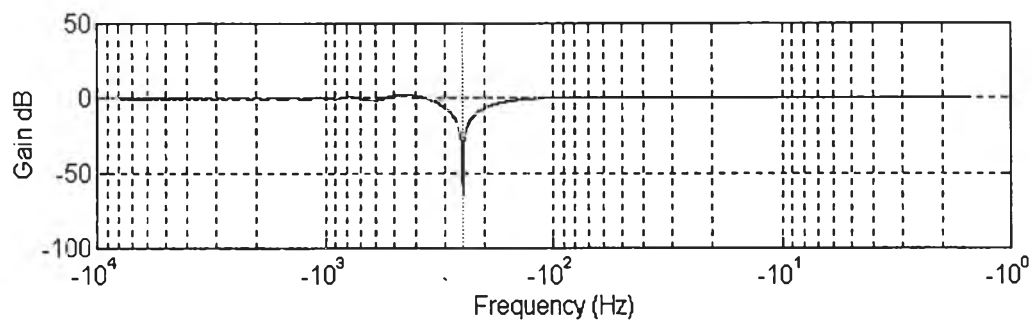


ข) อัตราขยายและเฟสสำหรับ Negative sequence

รูปที่ 4.11 ลักษณะสมบัติการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกเมื่อใช้ Recursive DFT แบบ 1/6 คาบตรวจ  
จับกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 11 ซีควนซ์ลบและ 7 13 ซีควนซ์บวก โดยใช้  $N = 102$



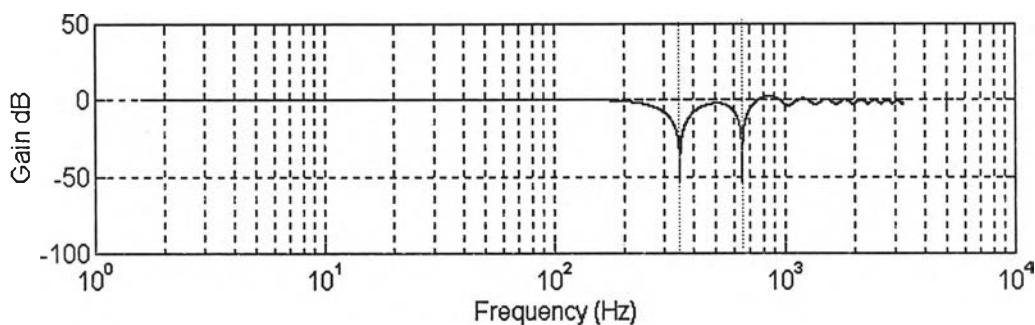
ก) อัตราขยายสำหรับ Positive sequence



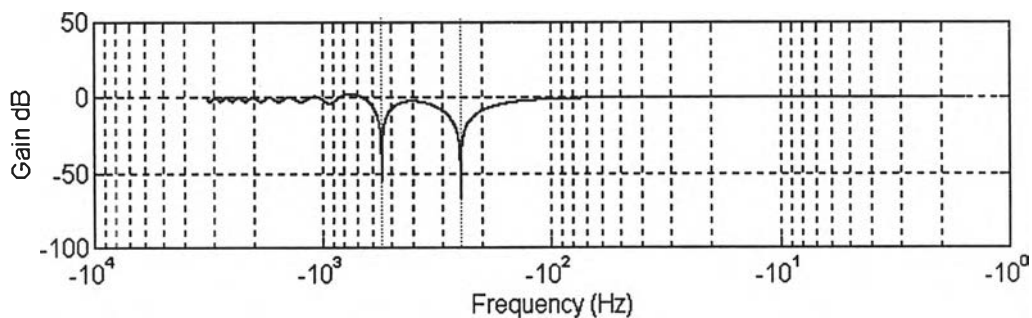
ข) อัตราขยายสำหรับ Negative sequence

รูปที่ 4.12 คุณสมบัติการกรองของวงจรกำลังแอกทีฟที่ใช้ Recursive DFT แบบ 1/6 คาบเมื่อกำจัด

เฉพาะกระแสร่มอนิกอันดับที่ 5 ซีควนซ์ลบและ 7 ซีควนซ์บวกใช้  $N=246$



ก) อัตราขยายสำหรับ Positive sequence



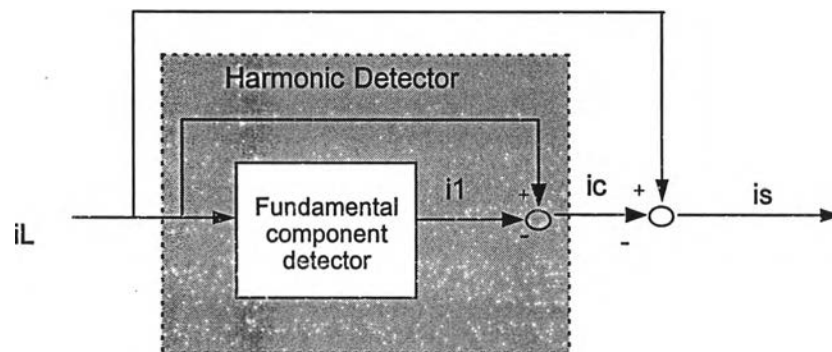
ข) อัตราขยายสำหรับ Negative sequence

รูปที่ 4.13 คุณสมบัติการกรองของวงจรกำลังแอกทีฟที่ใช้ Recursive DFT แบบ 1/6 คาบเมื่อกำจัด

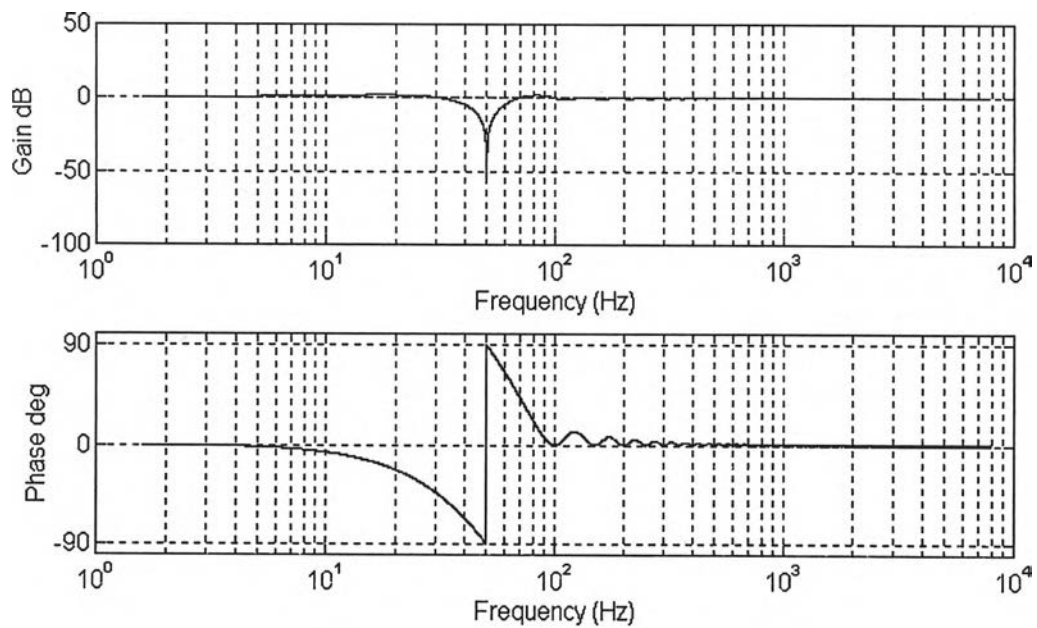
เฉพาะกระแสร่มอนิกอันดับที่ 5 11 ซีควนซ์ลบและ 7 13 ซีควนซ์บวกใช้  $N=102$

#### 4.2.2 วงจรกรองกำลังแอกทีฟที่กำจัดกระแสฮาร์มอนิกทุกอันดับ

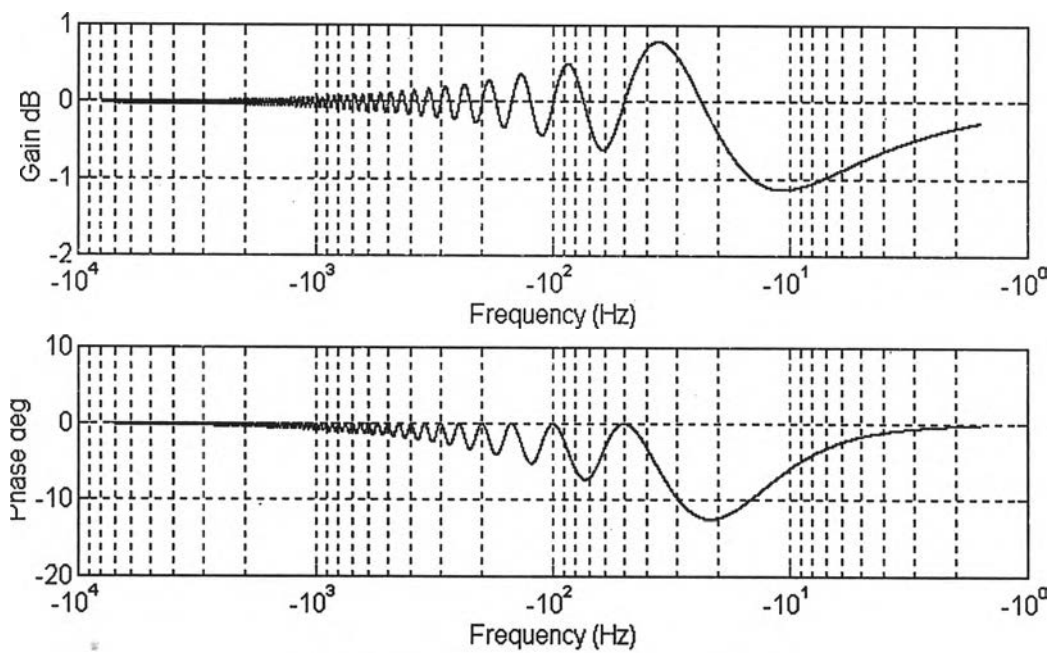
วงจรกรองกำลังแอกทีฟในลักษณะนี้จะคล้ายกับวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่กำจัดกระแสฮาร์มอนิกเฉพาะบางอันดับตามรูปที่ 4.1 โดยมีความแตกต่างตรงที่ตัวตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกจะต้องเปลี่ยนมาเป็นตัวตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกทุกอันดับ การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกทุกอันดับมีหลักการคือ เราจะทำการตรวจจับหากระแสความถี่มูลฐาน และจึงนำไปลบออกจากกระแสโหลดทั้งหมดก็จะได้กระแสที่เหลือเป็นกระแสฮาร์มอนิกทั้งหมดตามต้องการ หลักการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกทุกอันดับแสดงเป็นบล็อกไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 4.14 รูปที่ 4.15 และ 4.16 แสดงลักษณะสมบัติการตรวจจับฮาร์มอนิกของตัวตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกทุกอันดับเมื่อใช้ Recursive DFT แบบเต็มคาบและ 1/6 คาบตามลำดับ คุณสมบัติในการกรองของวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกทุกอันดับในลักษณะนี้จะมีลักษณะผลตอบเชิงความถี่เหมือนกับตัวตรวจจับที่ตรวจจับกระแสความถี่มูลฐานดังแสดงตามรูปที่ 4.17 และ 4.18



รูปที่ 4.14 บล็อกไดอะแกรมแสดงการทำงานของวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ตรวจจับกระแสทางด้านโหลด กรณีกำจัดกระแสฮาร์มอนิกทุกอันดับ

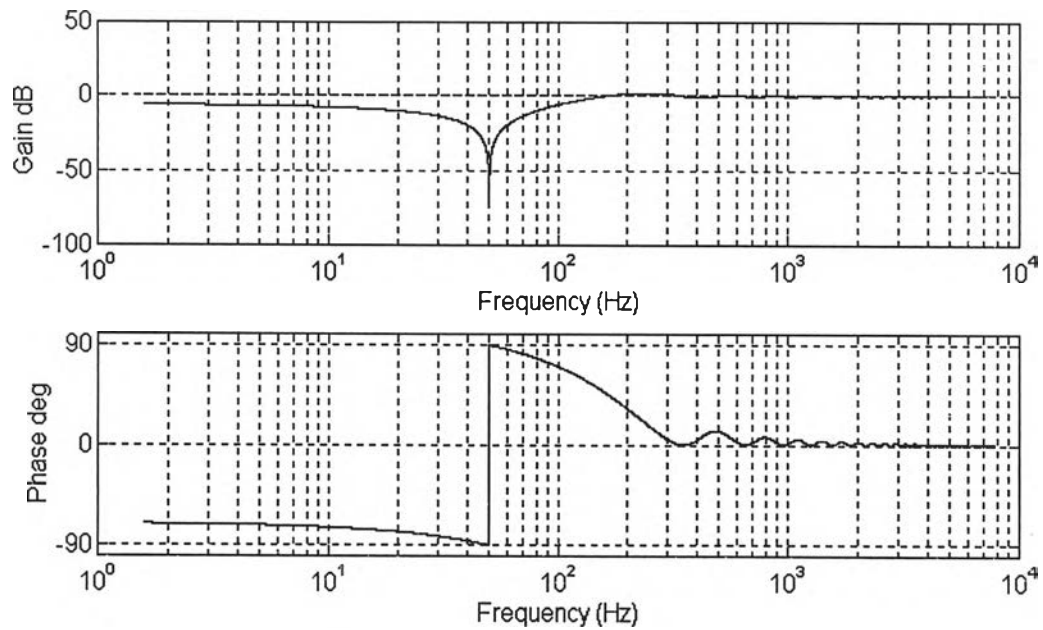


ก) อัตรายขยายและเฟสสำหรับ Positive sequence

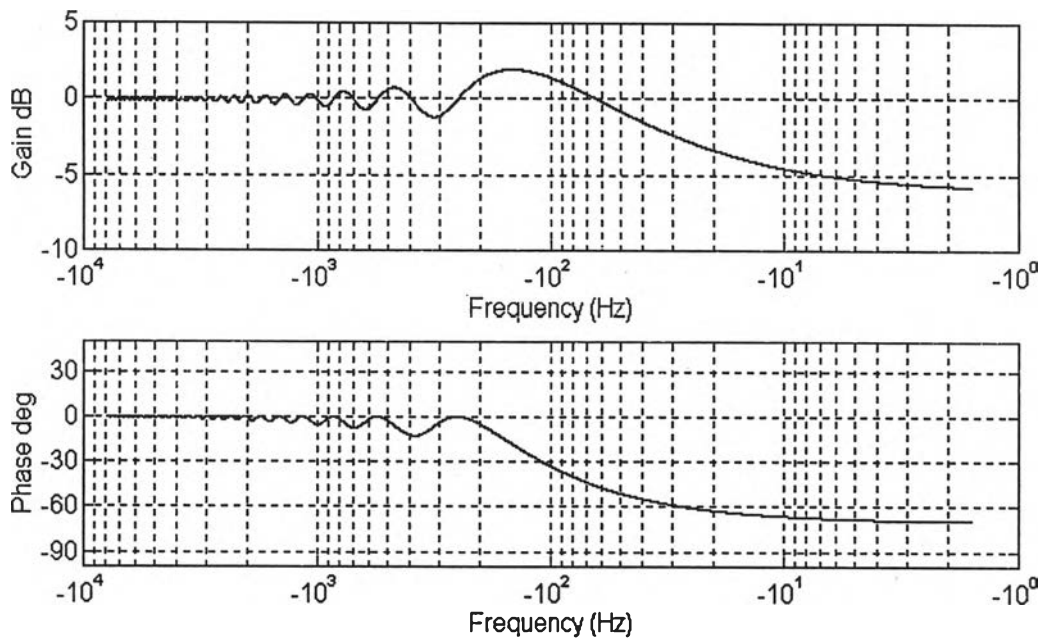


ข) อัตรายขยายและเฟสสำหรับ Negative sequence

รูปที่ 4.15 ลักษณะสมบัติการตรงจับกระแสฮาร์โมนิกเมื่อใช้ Recursive DFT แบบเต็มคาบตรง  
จับกระแสฮาร์โมนิกทุกอันดับ โดยใช้  $N = 360$

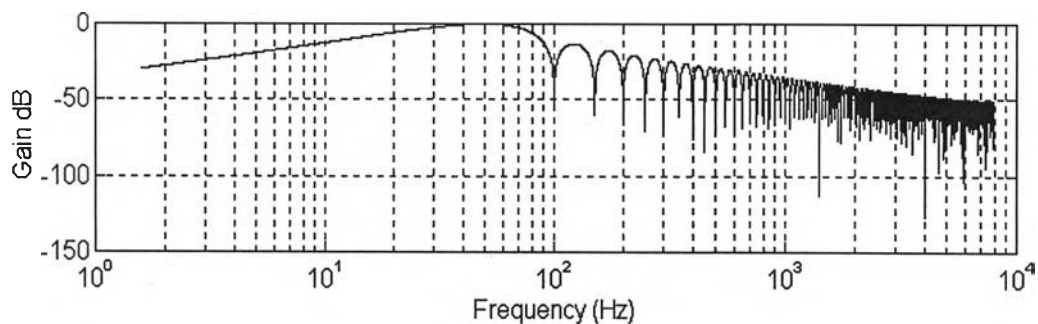


ก) อัตราขยายและเฟสสำหรับ Positive sequence

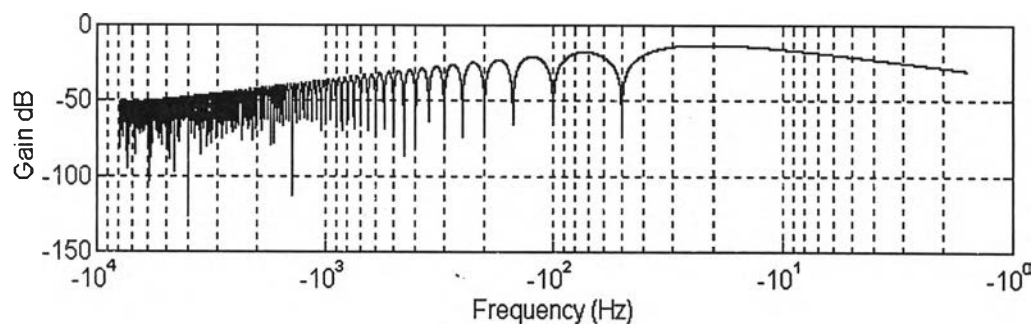


ข) อัตราขยายและเฟสสำหรับ Negative sequence

รูปที่ 4.16 ลักษณะสมบัติการตรวจจับกระแสฮาร์โมนิกเมื่อใช้ Recursive DFT แบบ 1/6 คาบตรวจ  
จับกระแสฮาร์โมนิกทุกอันดับ โดยใช้  $N = 360$

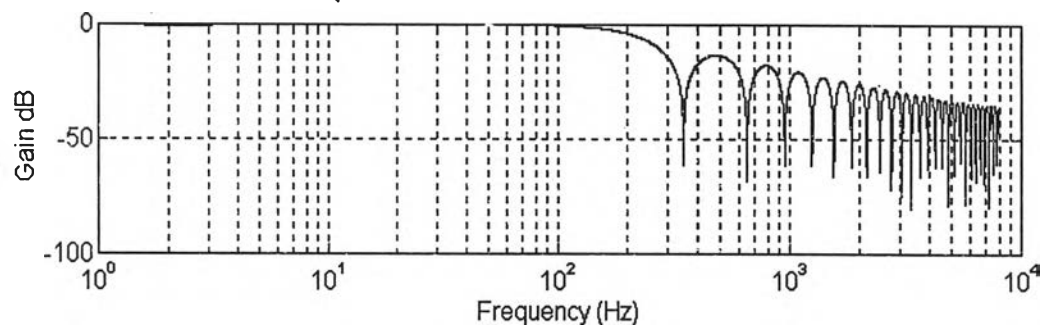


ก) อัตรายบายสำหรับ Positive sequence

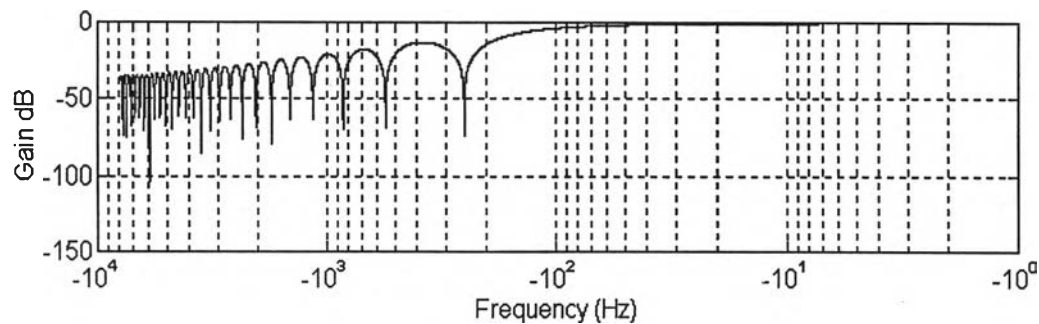


ข) อัตรายบายสำหรับ Negative sequence

รูปที่ 4.17 คุณสมบัติการกรองของวงจรกำลังแอกทีฟที่ใช้ Recursive DFT แบบเต็มคาบเมื่อกำจัด  
กระแสฮาร์โมนิกทุกอันดับ ใช้  $N=360$



ก) อัตรายบายสำหรับ Positive sequence

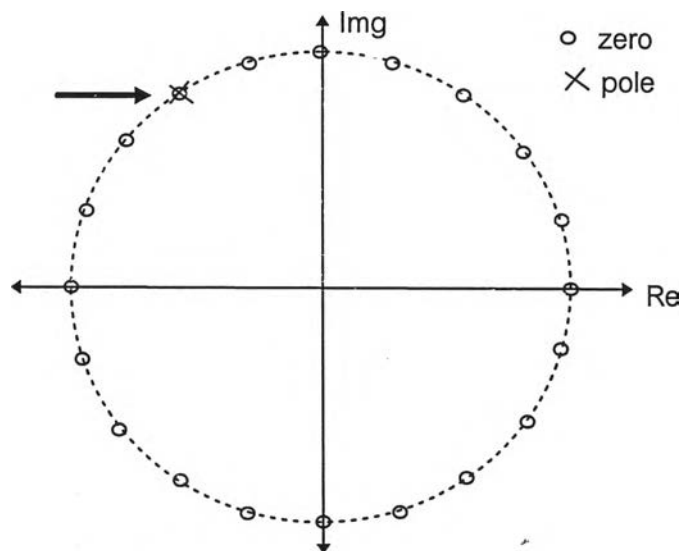


ข) อัตรายบายสำหรับ Negative sequence

รูปที่ 4.18 คุณสมบัติการกรองของวงจรกำลังแอกทีฟที่ใช้ Recursive DFT แบบ 1/6 คาบเมื่อกำจัด  
กระแสฮาร์โมนิกทุกอันดับ ใช้  $N=360$

### 4.3 การคำนวณ Recursive DFT

การคำนวณ Recursive DFT นั้นอาจดูเหมือนว่าเราจะสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการที่ (3.8) หรือ (3.13) โดยตรง แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากฟังก์ชันโอนย้ายของ Recursive DFT ทั้ง 2 แบบตามสมการที่ (3.10) และ (3.15) จะมีขั้วและศูนย์อยู่บนวงกลมหนึ่งหน่วยพอดี ตัวอย่างสำหรับการทำ DFT แบบเต็มคาบกรณีที่มี  $N = 20$  แสดงในรูปที่ 4.19 ลักษณะของขั้วและศูนย์เช่นนี้จะต้องพึงระวังมากในการคำนวณเนื่องจากในทางปฏิบัตินั้นการประมวลผลทางดิจิทัลจะมีข้อจำกัดของความยาวของตัวเลข (จำนวนบิต) ที่เราทำได้มีค่าจำกัดโดยขึ้นอยู่กับไมโครคอนโทรลเลอร์ที่เราใช้ (Numerical Finite Word Length Effect) เราจึงไม่สามารถบูรณาการสัมประสิทธิ์ได้ถูกต้องแม่นยำเสมอไป สัมประสิทธิ์ที่ไม่ใช่เลขจำนวนเต็มง่ายๆจะมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นเสมอ (Quantization Error) ถ้าสัมประสิทธิ์ที่ใช้ในการคำนวณมีความคลาดเคลื่อนทำให้ขั้วของตัวตรวจจับเลื่อนออกนอกวงกลมหนึ่งหน่วยตัวตรวจจับก็จะขาดเสถียรภาพ และถึงแม้ขั้วที่ได้จะเข้ามาอยู่ภายในวงกลมหนึ่งหน่วยคุณลักษณะในการตรวจจับก็จะยังคงเสียไป เราจะพิจารณาถึงปัญหานี้และอธิบายถึงวิธีแก้ปัญหาดังต่อไปนี้

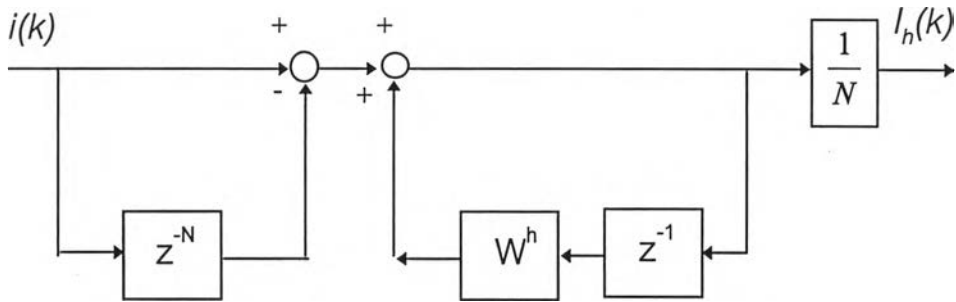


รูปที่ 4.19 ขั้วและศูนย์ของ  $D_h(z)$  เมื่อ  $h = 7$  และ  $N = 20$

#### 4.3.1 การคำนวณ Recursive DFT บนแกนนิ่ง

เมื่อเราพิจารณาการทำ Recursive DFT แบบเต็มคาบซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (3.8) การคำนวณในลักษณะนี้ก็คือการสร้างฟังก์ชันโอนย้ายที่อยู่ในรูปของวงจรกรอง IIR ตาม

สมการที่ (3.10) ซึ่งเราสามารถทำได้โดยการสร้างศูนย์จำนวน  $N$  ตัวของ  $1 - z^{-N}$  และขั้ว 1 ตัวที่  $1 - W^h z^{-1}$  อย่างตรงไปตรงมา ดังแสดงหลักการเป็นบล็อกไดอะแกรมดังรูปที่ 4.20 เมื่อ  $i(k)$  คือ สเปซเวกเตอร์ของกระแสที่เราต้องการหาค่าฮาร์มอนิก



รูปที่ 4.20 บล็อกไดอะแกรมแสดงการคำนวณ Recursive DFT แบบเติมคาบบนแกนนิ่ง

เพื่อที่จะให้ได้ตัวตรวจจับที่ทำงานได้อย่างถูกต้อง เราจะต้องสร้างทั้งขั้วและศูนย์ให้อยู่บนวงกลมหนึ่งหน่วยพอดี และขั้วต้องตัดกับศูนย์พอดีที่ความถี่ที่ต้องการตรวจจับด้วย ในกรณีของศูนย์ของ  $1 - z^{-N}$  ซึ่งมีตัวเลขสัมประสิทธิ์เป็น 1 นั้น เราสามารถทำได้อย่างถูกต้องแม่นยำ แต่สำหรับขั้ว  $1 - W^h z^{-1}$  นั้น เป็นไปไม่ได้ที่จะได้ค่าที่ถูกต้อง เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์  $W^h$  เมื่อค่า  $h \neq 0$  หรือ  $\frac{N}{2}$  เป็นเลขอตรรกยะย่อมมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นเสมอ ดังนั้นเราจึงไม่สามารถได้คุณลักษณะของตัวตรวจจับที่ดีได้โดยวิธีนี้ ยกตัวอย่างเช่น การทำ Recursive DFT เมื่อ  $h = 7$  และ  $N = 360$  ด้วย Register ที่มีความยาว 16 Bits ค่าสัมประสิทธิ์ที่เราต้องการบูรณาการคือ

$$W^7 = e^{j\frac{14\pi}{N}} = \cos\left(\frac{14\pi}{360}\right) + j \sin\left(\frac{14\pi}{360}\right) = 0.99255 + j0.12187$$

จากนั้นเราจะคูณค่า  $W^7$  ด้วย 16384 เพื่อประมาณเป็นจำนวนเต็มสำหรับคำนวณด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์โดยพิเศษที่เป็นทศนิยมทิ้งทั้งหมด เราปิดเศษทิ้งเสมอเนื่องจากสัมประสิทธิ์ที่เราต้องการมีขนาดเท่ากับ 1 ถ้าเราปิดเศษขึ้นสัมประสิทธิ์ที่ได้จะมีขนาดมากกว่า 1 จะทำให้ขั้วที่ได้ไปอยู่นอกวงกลมหนึ่งหน่วย และตัวตรวจจับที่ได้จะขาดเสถียรภาพ เราจะได้ค่าสัมประสิทธิ์ภายหลังการคูณเป็น

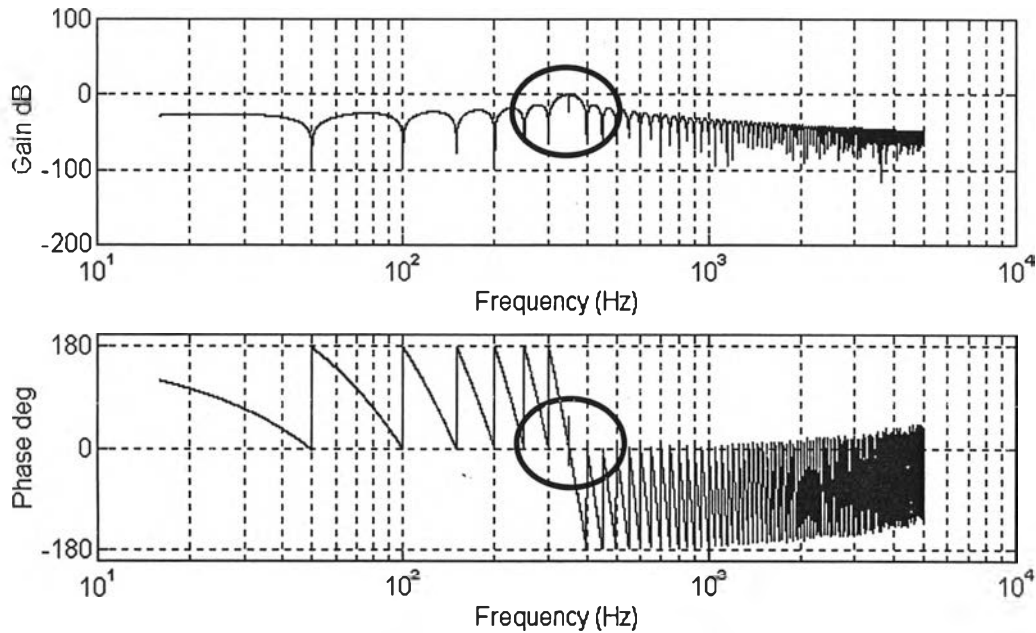
$$W^7 \times 16384 \approx 16261 + j1996$$

ซึ่งเมื่อคำนวณกลับเป็นค่าของขั้วที่ได้จริงจะเป็น

$$W^7 \approx 0.99249 + j0.12183$$



เราจะเห็นได้ว่าข้อที่ได้จะคลาดเคลื่อนจากค่าจริง และลักษณะสมบัติการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกของตัวตรวจจับที่สร้างได้จะเป็นดังรูปที่ 4.21



อัตราขยายและเฟสสำหรับ Positive sequence

รูปที่ 4.21 ลักษณะสมบัติการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกเมื่อคำนวณ Recursive DFT บนแกนนิ่ง โดยใช้  $h = 7$   $N = 360$

ความคลาดเคลื่อนของสัมประสิทธิ์ที่เกิดขึ้นแม้เพียงเล็กน้อยก็จะทำให้ผลตอบเชิงความถี่ที่ได้ ณ ความถี่ที่เราต้องการตรวจจับมีความผิดพลาดได้มาก ทั้งนี้เนื่องมาจากการที่ข้อและศูนย์ไม่หักล้างกันพอดี ผลของศูนย์ที่ยังคงเหลืออยู่บนวงกลมหนึ่งหน่วยจะทำให้ค่าอัตราขยาย ณ ความถี่ที่ต้องการตรวจจับมีค่าเท่ากับ 0 แทนที่จะเท่ากับ 1 โดยทั่วไปปัญหานี้เราอาจไม่สังเกตเห็นเมื่อเราทำการจำลองการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์ เนื่องจากข้อที่ได้จะอยู่ใกล้วงกลมหนึ่งหน่วยมากซึ่งหมายความว่าค่าคงตัวทางเวลาซึ่งสัมพันธ์กับขั้วนั้นจะมีความผิดพลาดจึงค่อยๆเกิดขึ้นทีละน้อยและใช้เวลานานกว่าจะสังเกตเห็นได้ชัด แต่ในการทำงานจริงเราจะพบปัญหานี้อย่างชัดเจน สำหรับการทำให้ Recursive DFT แบบ 1/6 คาบ เราก็จะพบปัญหานี้เช่นกัน

#### 4.3.2 การคำนวณ Recursive DFT บนแกนหมุน

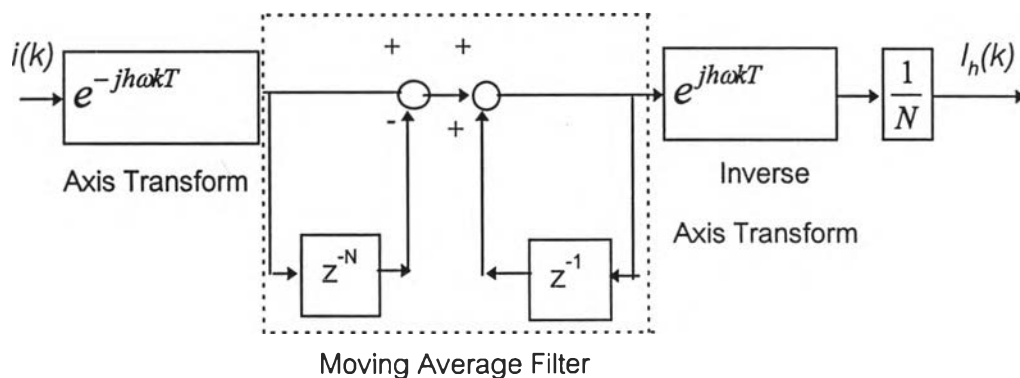
เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาที่เกิดขึ้นจากความคลาดเคลื่อนของสัมประสิทธิ์ในการคำนวณ Recursive DFT บนแกนนิ่ง เราจะเปลี่ยนวิธีการคำนวณ Recursive DFT จากการคำนวณบนแกนนิ่ง

ไปทำบนแกนหมุนที่มีความถี่และทิศทางการหมุน(เมื่อเทียบกับแกนนิ่ง)เท่ากับความถี่และทิศทางการหมุนของสเปซเวกเตอร์ของกระแสฮาร์มอนิกที่จะทำการตรวจจับ ( $h\omega$ ) ดังแสดงในรูปที่ 4.22 โดยวิธีการนี้สัญญาณสเปซเวกเตอร์ของกระแสจะถูกแปลงให้ไปอยู่บนแกนหมุน ( $h\omega$ ) จากนั้นจึงนำไปทำการคำนวณตามฟังก์ชันโอนย้ายซึ่งได้จากการแปลงฟังก์ชันโอนย้ายบนแกนนิ่ง(สมการ (3.11))ของการทำ Recursive DFT มาอยู่บนแกนหมุน โดยใช้หลักการแปลงดังนี้คือ ฟังก์ชันโอนย้ายใน z-Domain บนแกนนิ่ง  $P(z)$  เมื่อแปลงมาอยู่บนแกนหมุนที่มีความถี่ ( $h\omega$ ) จะกลายมาเป็นฟังก์ชัน  $P(W^{-h}z)$  ดังนั้นเราจะได้ฟังก์ชันโอนย้ายของการทำ Recursive DFT บนแกนหมุน  $D'_h(z)$  และ  $D'_{6h}(z)$  ซึ่งแปลงมาจาก  $D_h(z)$  และ  $D_{6h}(z)$  มีค่าดังสมการที่ (4.1) และ (4.2) ตามลำดับ (ดูการพิสูจน์ได้ในภาคผนวก ก)

$$D'_h(z) = \frac{1}{N} \frac{1 - z^{-N}}{1 - z^{-1}} \quad (4.1)$$

$$D'_{6h}(z) = \frac{6}{N} \frac{1 - z^{-\frac{N}{6}}}{1 - z^{-1}} \quad (4.2)$$

จากรูปสมการของ  $D'_h(z)$  และ  $D'_{6h}(z)$  เราอาจพิจารณาได้ว่าการคำนวณ Recursive DFT บนแกนหมุนก็คือการคำนวณ Moving Average แบบ Recursive นั่นเอง ด้วยวิธีการแปลงแกนหมุนนี้เราจะพบว่าตัว  $1 - W^h z^{-1}$  ได้ถูกแปลงให้กลายเป็น  $1 - z^{-1}$  ซึ่งเราสามารถที่จะคำนวณได้อย่างถูกต้องแม่นยำโดยไม่มีปัญหาเรื่องความคลาดเคลื่อนของสัมประสิทธิ์



รูปที่ 4.22 บล็อกไดอะแกรมแสดงการคำนวณ Recursive DFT แบบเต็มคาบบนแกนหมุน

รูปที่ 4.22 แสดงบล็อกไดอะแกรมของการคำนวณ Recursive DFT แบบเต็มคาบ ( $D'_h(z)$ ) บนแกนหมุน จากรูปจะสังเกตเห็นได้ว่าโครงสร้างของตัวตรวจจับกระแสฮาร์โมนิกที่ใช้ Recursive DFT ในลักษณะนี้จะคล้ายคลึงกันกับการตรวจจับฮาร์โมนิกโดยใช้วงจรรองผ่านต่ำบนแกนหมุน โดยจะมีความแตกต่างกันตรงที่ การทำ Recursive DFT จะใช้ Moving Average ในขณะที่วิธีวงจรรองบนแกนหมุนทั่วไปเราจะใช้วงจรรองผ่านต่ำธรรมดาตนเอง

#### 4.4 การชดเชยผลของเวลาประวิงอันเนื่องมาจากการคำนวณด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

##### 4.4.1 หลักการในการชดเชย

ในทางปฏิบัติจริงนั้นการควบคุมการทำงานวงจรรองกำลังแอกทีฟโดยไมโครคอนโทรลเลอร์จะต้องใช้ช่วงเวลาระยะหนึ่งในการคำนวณหาค่ากระแสฮาร์โมนิก การควบคุมบัสไฟตรง ฯลฯ ดังนั้นเราต้องกำหนดคาบเวลาการควบคุมหรือคาบเวลาการสุ่มตัวอย่างให้ยาวเพียงพอที่จะทำให้เราสามารถทำการคำนวณต่างๆได้เสร็จสิ้นภายในหนึ่งคาบการสุ่มนี้ โดยปกติเรานิยมกำหนดความยาวของคาบการสุ่มให้มากกว่าเวลาที่ต้องใช้ในการคำนวณเล็กน้อยเพื่อให้ได้ความเร็วการสุ่มที่สูงที่สุดซึ่งจะทำให้ได้ความละเอียดของข้อมูลสูง ดังนั้นโดยทั่วไปเวลาประวิงที่เกิดจากการคำนวณของไมโครคอนโทรลเลอร์จะมีค่าประมาณ 1 คาบการสุ่ม ผลของเวลาประวิงนี้จะทำให้ข้อมูลกระแสฮาร์โมนิกที่ได้จากการคำนวณมีค่าต่ำกว่าค่าจริงและทำให้การกำจัดกระแสฮาร์โมนิกด้วยประสิทธิภาพลง อย่างไรก็ตามการตรวจจับกระแสฮาร์โมนิกโดยใช้ Recursive DFT นั้นเราสามารถชดเชยผลของเวลาประวิงในส่วนนี้ได้ดังที่จะได้อธิบายต่อไปนี้

การทำ DFT แบบ Sliding Window โดยใช้ฟังก์ชันมูลฐานแบบ B ซึ่งได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 จะสามารถชดเชยผลของเวลาประวิงได้ การทำ DFT ในลักษณะนี้มีการคำนวณดังสมการที่ (3.7) คือ

$$\begin{aligned} I_h(k) &= \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} i(k-n) \cdot W^{h(n+1)} \\ &= I_h W^{h(k+1)} \\ &= i_h(k+1) \end{aligned} \quad (3.7)$$

เมื่อ  $i_h(k)$  คือค่าของกระแสฮาร์โมนิกอันดับที่  $h$  ณ เวลาปัจจุบัน  $k$  ค่าที่ได้จากการทำ DFT ในลักษณะนี้แตกต่างจากการทำ DFT แบบ A (สมการที่ 3.6) ตรงที่ค่ามูเฟสของฮาร์โมนิกอันดับที่  $h$  ที่ได้จะมีการเลื่อนเฟสไปเท่ากับค่ามูเฟสของกระแสฮาร์โมนิก

ที่เปลี่ยนแปลงใน 1 คาบการสุ่มซึ่งสามารถตีความได้ว่าเป็นการคาดคะเน (Prediction) ค่ากระแสฮาร์มอนิกที่ได้ ณ เวลาปัจจุบันไปอีก 1 คาบการสุ่ม ดังนั้นถ้าเราทำ DFT ในลักษณะนี้ก็จะสามารถชดเชยผลของเวลาประวิงได้ สมการ (3.7) สามารถคำนวณในลักษณะ Recursive ได้โดยใช้สมการที่ (4.3)

$$I_h(k) = W^h I_{ch}(k-1) + \frac{W^h}{N} (i(k) - i(k-N)) \quad (4.3)$$

เราสามารถทำการแปลง Z สมการที่ (4.3) และหาฟังก์ชันโอนย้ายใน z-Domain  $D_{ch}(z)$  จาก  $i(z)$  ไปยัง  $I_h(z)$  ได้ดังสมการที่ (4.4)

$$D_{ch}(z) = \frac{W^h}{N} \frac{1 - z^{-N}}{1 - W^h z^{-1}} \quad (4.4)$$

สำหรับการทำ DFT แบบ 1/6 คาบเมื่อทำการคำนวณแบบชดเชยผลของเวลาประวิง เราจะสามารถหาสูตรการคำนวณแบบ Recursive ได้ดังสมการที่ (4.5)

$$I_{6h}(k) = W^h I_{6h}(k-1) + \frac{6 \cdot W^h}{N} (i(k) - i(k - \frac{N}{6})) \quad (4.5)$$

ในทำนองเดียวกันสมการที่ (4.5) จะมีฟังก์ชันโอนย้าย  $D_{6ch}(z)$  จาก  $i(z)$  ไปยัง  $I_{6h}(z)$  ได้ดังสมการที่ (4.6)

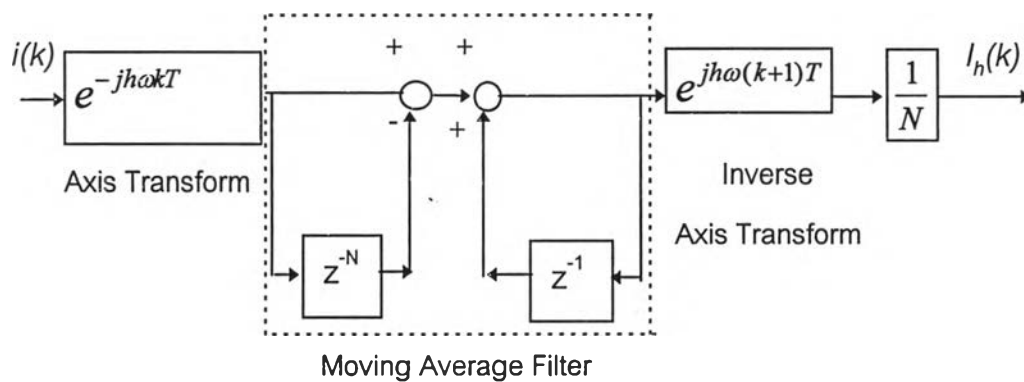
$$D_{6ch}(z) = \frac{6 \cdot W^h}{N} \frac{1 - z^{-\frac{N}{6}}}{1 - W^h z^{-1}} \quad (4.6)$$

#### 4.4.2 การคำนวณ Recursive DFT ที่มีการชดเชยผลของเวลาประวิงบนแกนหมุน

ฟังก์ชันโอนย้าย  $D_{ch}(z)$  และ  $D_{6ch}(z)$  ในสมการที่ (4.4) และ (4.6) นั้นจะมีความแตกต่างจากฟังก์ชันโอนย้ายในการทำ Recursive DFT ธรรมดาตรงที่มีการคูณด้วยค่าคงตัว  $W^h$  เพิ่มขึ้นมาเท่านั้น เราสามารถทำการคูณนี้ได้โดยง่ายเมื่อเราคำนวณ Recursive DFT บนแกนหมุนโดยเพียง

เพิ่มค่าดัชนีเวลาจาก  $k$  เป็น  $k+1$  ในการแปลงกลับจากแกนหมุนไปแกนนิ่งเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 4.23

จากหลักการชดเชยผลของเวลาประวิงเราจะเห็นได้ว่า เราต้องทำการเลื่อนมุมเฟสเท่ากับ  $\omega hT$  ซึ่งจะมีค่าแตกต่างกันสำหรับกระแสมอนิกแต่ละความถี่ที่ต้องการหา ดังนั้นในกรณีที่ทำการตรวจจับกระแสมอนิกทุกอันดับเราจะไม่สามารถทำการชดเชยผลของเวลาประวิงโดยใช้หลักการนี้ได้ ทั้งนี้เนื่องจากว่าถึงแม้เราจะสามารถคาดคะเนค่าของกระแสในส่วนองค์ประกอบมูลฐานได้แต่เราไม่สามารถคาดคะเนค่าของกระแสโหดได้นั่นเอง



รูปที่ 4.23 บล็อกไดอะแกรมแสดงการคำนวณ Recursive DFT แบบเติมคาบบนแกนหมุนเมื่อชดเชยผลของเวลาประวิง