

บทที่ 6

เงื่อนไขสำคัญในการหาลักษณะสมบัติของระบบและผลการทดสอบ

ในบทนี้เราจะกล่าวถึงเงื่อนไขสำคัญในการหาลักษณะสมบัติของระบบสำหรับระบบ 2 มวล ซึ่งได้แก่ การเลือกใช้สัญญาณด้านเข้าเพื่อกระตุ้นระบบได้อย่างเหมาะสมและการเลือกคาบเวลาในการสุ่มตัวอย่างข้อมูลเพื่อนำมาประมวลผล จากนั้นเราจะทำการทดสอบเงื่อนไขต่าง ๆ เหล่านี้กับการหาลักษณะสมบัติของระบบวงรอบเปิดสำหรับระบบ 2 มวลเพื่อตรวจสอบ โดยการนำเอาข้อมูลของสัญญาณด้านเข้าและสัญญาณด้านออกของระบบ 2 มวลคือแรงบิดของมอเตอร์และความเร็วของมอเตอร์ตามลำดับมาประมวลผลโดยใช้แบบจำลองแบบ 'ARX' ซึ่งผลจากการประมวลผลจะทำให้เราทราบถึงฟังก์ชันโอนย้ายของระบบ เราจะพิจารณาถึงผลของการหาลักษณะสมบัติที่ได้จากการทดสอบและจากการจำลองด้วย MATLAB/SIMULINK เปรียบเทียบกับระบบจริงซึ่งใช้โพลด์จำลอง ทั้งนี้ระบบจริงยังไม่ได้รวมผลของเวลาประวิงอยู่ด้วย ค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดแสดงไว้ในภาคผนวก ข เรามุ่งเน้นถึงการหาลักษณะสมบัติของระบบในแถบความถี่หลักที่ครอบคลุมความถี่เรโซแนนซ์ของระบบ ผลการทดสอบที่ได้จะแสดงให้เห็นถึงความสำคัญในการเลือกใช้สัญญาณด้านเข้าเพื่อกระตุ้นระบบได้อย่างเหมาะสม การเลือกคาบเวลาในการสุ่มตัวอย่างข้อมูลเพื่อนำมาประมวลผล และปัญหาจากเวลาประวิงที่มีอยู่ในมอเตอร์แบบเซอร์โวซึ่งส่งผลต่อการเลือกสัญญาณด้านเข้าและคาบเวลาในการสุ่มตัวอย่างข้อมูล

6.1 เงื่อนไขในการเลือกสเปกตรัมของสัญญาณด้านเข้า

เนื่องจากวิธีการประมวลผลแบบการประมาณค่ากำลังสองน้อยสุด ที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 4 เป็นวิธีการประมวลผลโดยมีหลักการในการคำนวณ โดยให้มีค่าผิดพลาดระหว่างระบบที่ประมาณได้กับระบบจริงน้อยที่สุดในความหมายของกำลังสองดังแสดงในสมการที่ (4.13) โดยนำมากล่าวได้ใหม่ดังนี้

$$\hat{\theta}^{LS} = \arg \min \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |\hat{P}(j\omega) - P(j\omega)|^2 |\hat{A}(j\omega)|^2 |U(j\omega)|^2 d\omega \quad (6.1)$$

จากสมการที่ (6.1) จะเห็นได้ว่าสเปกตรัมของสัญญาณด้านเข้าเป็นเสมือนค่าน้ำหนัก (weighting function) ของสมการในการประมวลผล ดังนั้นเมื่อเราใช้สัญญาณด้านเข้าที่มีพลังงานของสเปก

ตรรก่อนข้างสูงในบริเวณแถบความถี่หลักของระบบ $P(s)$ จะทำให้เราสามารถประมวลผลหาค่าประมาณของระบบ $\hat{P}(s)$ ได้ใกล้เคียงกับค่าจริง โดยในที่นี้เราจะพิจารณาถึงสเปกตรัมของสัญญาณด้านเข้า 2 ชนิดได้แก่

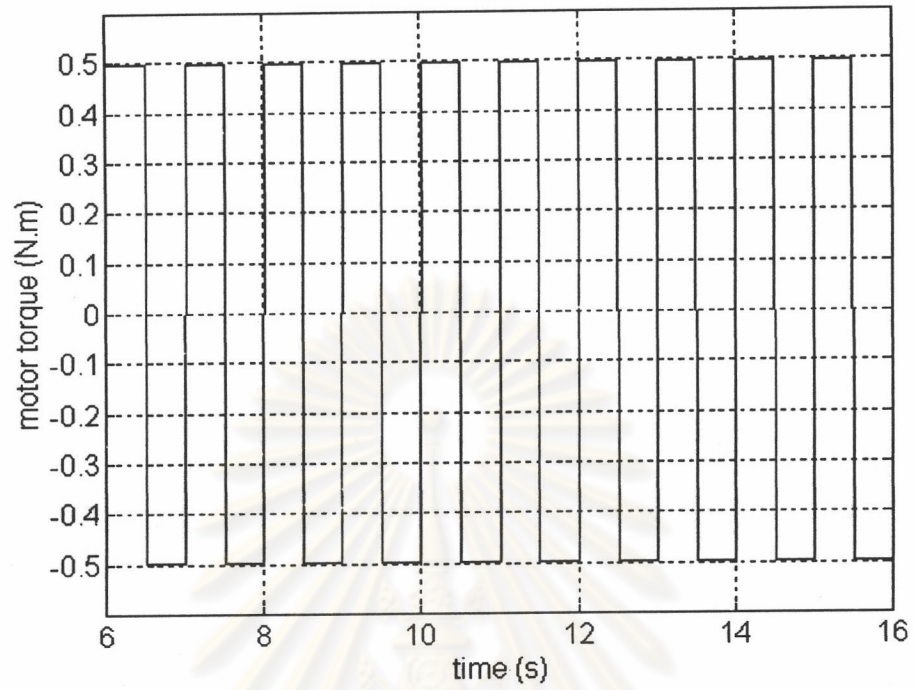
6.1.1 การใช้สัญญาณสี่เหลี่ยมเป็นสัญญาณด้านเข้า

สัญญาณสี่เหลี่ยมที่มีความถี่ ω เป็นสัญญาณที่มีสเปกตรัมที่ความถี่ $\omega, 3\omega, 5\omega, 7\omega, \dots$ โดยสเปกตรัมที่ความถี่ ω จะมีค่าสูงที่สุด เราพิจารณาจากสมการที่ (6.1) ได้ว่าเมื่อเราใช้สัญญาณสี่เหลี่ยมเป็นสัญญาณด้านเข้าแล้วควรจะได้ผลของการหาลักษณะสมบัติของระบบใกล้เคียงกับค่าจริงที่ความถี่ $\omega, 3\omega, 5\omega, 7\omega, \dots$ แต่โอกาสที่จะให้ลักษณะสมบัติโดยรวมของระบบในแถบความถี่ที่เราสนใจจะมีน้อย เนื่องจากจำนวนความถี่ที่ใช้กระตุ้นระบบมีน้อยและจะต้องกระตุ้นระบบให้ตรงกับความถี่เรโซแนนซ์ของระบบ เราจะทดสอบการหาลักษณะสมบัติของระบบโดยใช้สัญญาณด้านเข้าเป็นสัญญาณสี่เหลี่ยมที่ความถี่ต่างๆ เพื่อดูผลต่อคุณภาพของการหาลักษณะสมบัติของระบบดังนี้คือ

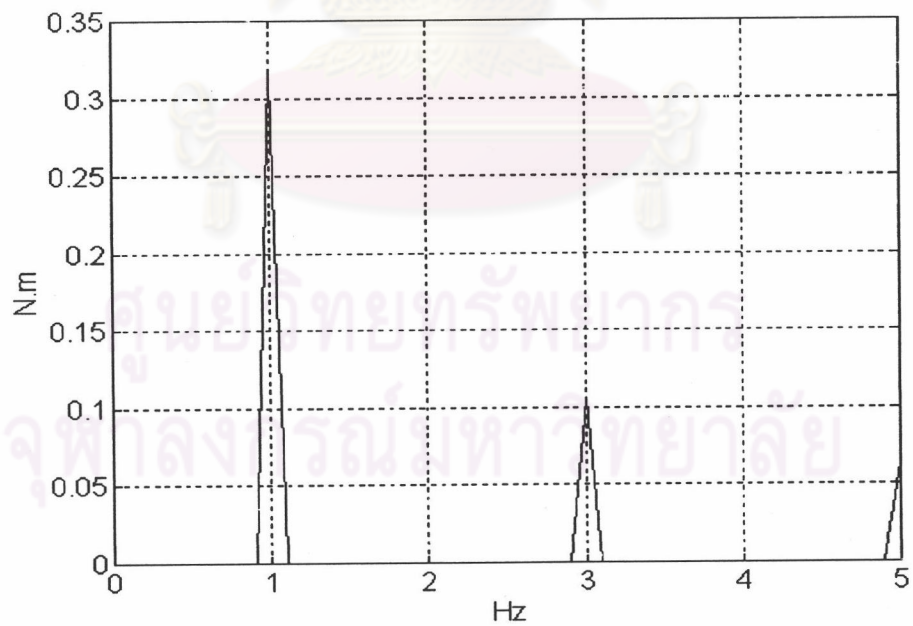
การทดสอบแบบที่ 6.1 : สัญญาณสี่เหลี่ยมความถี่ 1 Hz (ความถี่เรโซแนนซ์ของระบบ)

เมื่อป้อนแรงบิดของมอเตอร์เป็นสัญญาณสี่เหลี่ยมความถี่ 1 Hz ขนาด ± 0.5 N.m เพื่อกระตุ้นระบบ 2 มวลที่มีความถี่เรโซแนนซ์เป็น 1.03 Hz โดยใช้เวลาในการสุ่มตัวอย่างเป็น 0.1 s และเก็บข้อมูลเป็นเวลา 10 s หลังจากเริ่มป้อนสัญญาณเป็นเวลา 6 s จะได้ผลการทดสอบดังที่แสดงในรูปที่ 6.1 ถึง 6.4

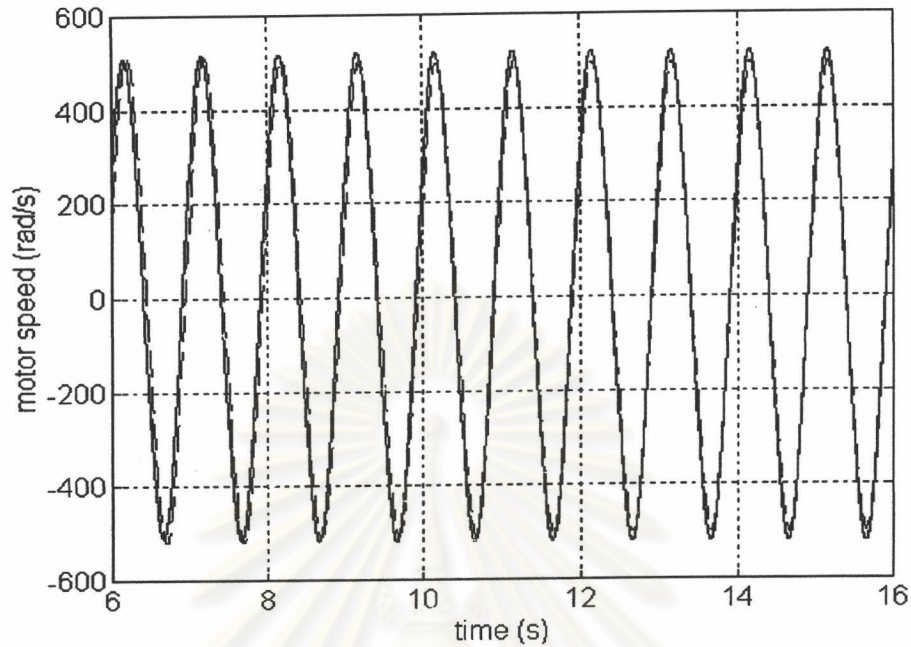
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



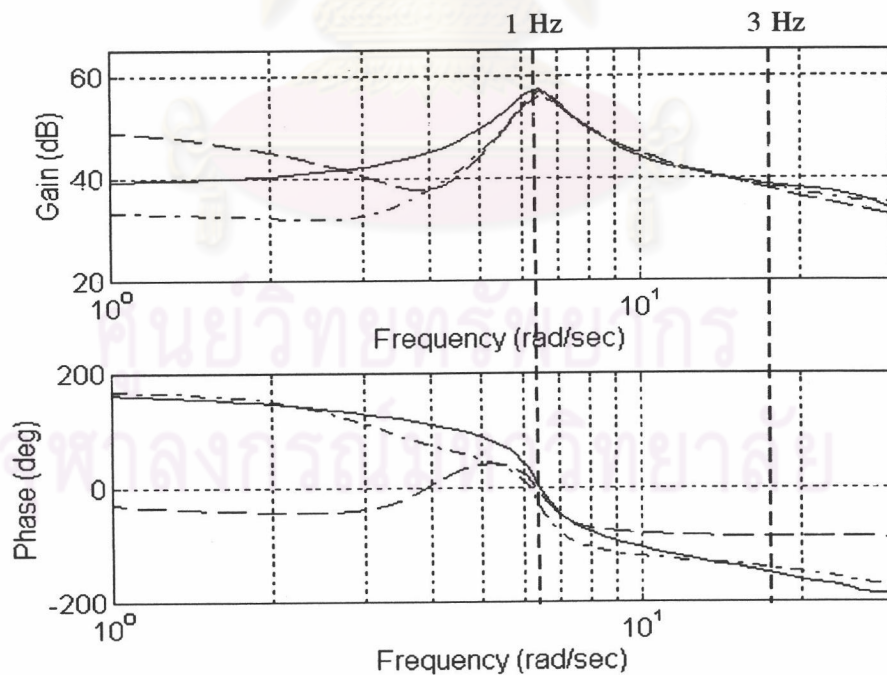
รูปที่ 6.1 แรงบิดของมอเตอร์ในการทดสอบแบบที่ 6.1



รูปที่ 6.2 สเปกตรัมของแรงบิดของมอเตอร์ในการทดสอบแบบที่ 6.1



รูปที่ 6.3 กราฟเปรียบเทียบความเร็วของมอเตอร์คำนวณจากระบบที่ประมาณได้จากการทดสอบ (เส้นทึบ) และความเร็วจริงของมอเตอร์ (เส้นประ) ในการทดสอบแบบที่ 6.1



รูปที่ 6.4 กราฟเปรียบเทียบอัตรายายและมุมเฟสของระบบที่ประมาณได้จากการทดสอบ (เส้นทึบ) ระบบที่ประมาณได้จากการจำลอง (เส้นประ-จุด) และระบบจริง (เส้นประ) ในการทดสอบแบบที่ 6.1

โดยที่ ระบบจริง (คำนวณจากค่าพารามิเตอร์ในภาคผนวก ข) จะมีค่าฟังก์ชันโอนย้ายเป็น

$$P(z) = \frac{114.0994z^2 - 193.047z + 96.5839}{z^3 - 2.3733z^2 + 2.1886z - 0.7659}$$

$$P(s) = \frac{1250s^2 + 2083.33s + 20833.33}{s^3 + 2.667s^2 + 43.33s + 58.33}$$

ระบบที่ประมาณได้จากการจำลองจะมีค่าฟังก์ชันโอนย้ายเป็น

$$\hat{P}(z)_{sim} = \frac{9.369z^3 + 118z^2 - 289.1z + 178.9}{z^3 - 3.439z^2 + 3.881z - 1.723}$$

$$\hat{P}(s)_{sim} = \frac{9.369s^3 + 1282s^2 - 3383s + 1.334 \times 10^4}{s^3 - 5.442s^2 + 34.39s - 271.6}$$

และระบบที่ประมาณได้จากการทดสอบจะมีค่าฟังก์ชันโอนย้ายเป็น

$$\hat{P}(z)_{exp} = \frac{-25.75z^3 + 83.45z^2 - 31.64z - 79.97}{z^3 - 0.9044z^2 - 0.02825z + 0.5335}$$

$$\hat{P}(s)_{exp} = \frac{-25.75s^3 + 742.7s^2 + 1128s - 1.864 \times 10^4}{s^3 + 6.282s^2 + 47.49s + 207.8}$$

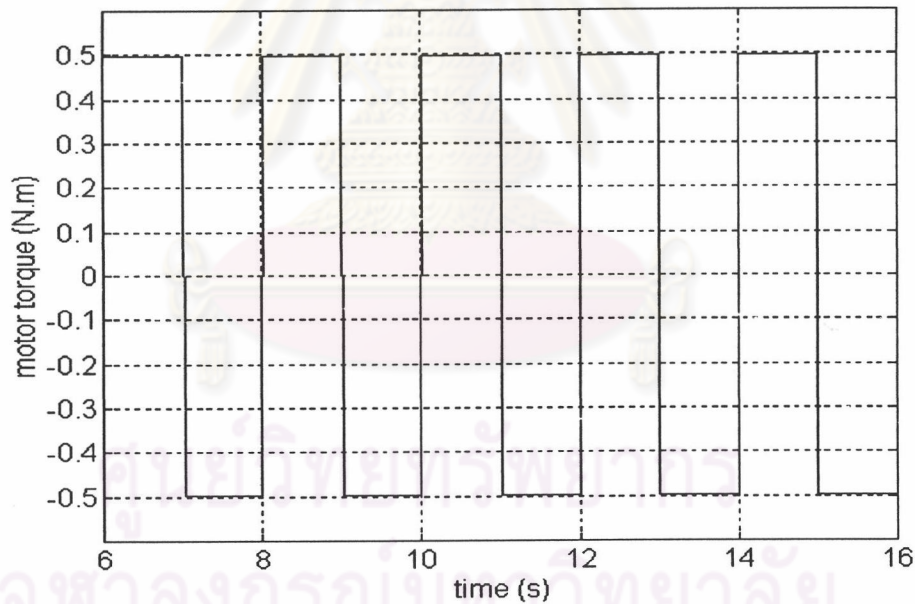
เราใช้วิธีการคงค่าอันดับศูนย์ (zero-order hold) ในการแปลงฟังก์ชันโอนย้ายในระบบเวลาไม่ต่อเนื่องมาให้อยู่ในระบบเวลาต่อเนื่อง เนื่องจากสัญญาณด้านเข้าที่เราใช้กระตุ้นระบบคือสัญญาณสี่เหลี่ยมและสัญญาณ PRBS ซึ่งเราจะได้กล่าวถึงต่อไปนั้น เป็นสัญญาณที่มีค่าคงที่ในช่วงระยะเวลาหนึ่ง ๆ ขาวพอสมควร เมื่อเรารวมตัวอย่างข้อมูลด้วยวิธีการคงค่าอันดับศูนย์ เราจะได้ค่าที่ตรงกับค่าจริงเช่นเดิม ดังนั้นวิธีการคงค่าอันดับศูนย์จึงเหมาะสำหรับการแปลงระบบเวลาไม่ต่อเนื่องมาให้อยู่ในระบบเวลาต่อเนื่อง

จากผลการทดสอบแบบที่ 6.1 ในรูปที่ 6.4 นั้นกราฟอัตราขยายและมุมเฟสของระบบที่ประมาณได้จากการทดสอบและระบบที่ประมาณได้จากการจำลองจะใกล้เคียงกับกราฟอัตราขยายและมุมเฟสของระบบจริงในบริเวณความถี่ 1 Hz ซึ่งเป็นความถี่ที่เรากระตุ้นระบบนั่นเอง และความถี่นี้เป็นความถี่เรโซแนนซ์ของระบบด้วย จึงทำให้เราสามารถเห็นลักษณะสมบัติของการเรโซแนนซ์ได้จากกราฟอัตราขยายและมุมเฟสที่ประมาณได้ แต่เราจะเห็นได้ว่าที่ความถี่ที่ต่ำกว่า 1 Hz นั้นกราฟจะผิดพลาดไปจากค่าจริงที่ควรจะได้ ทั้งนี้เนื่องมาจากความถี่ที่เราป้อนเข้าไปกระตุ้น

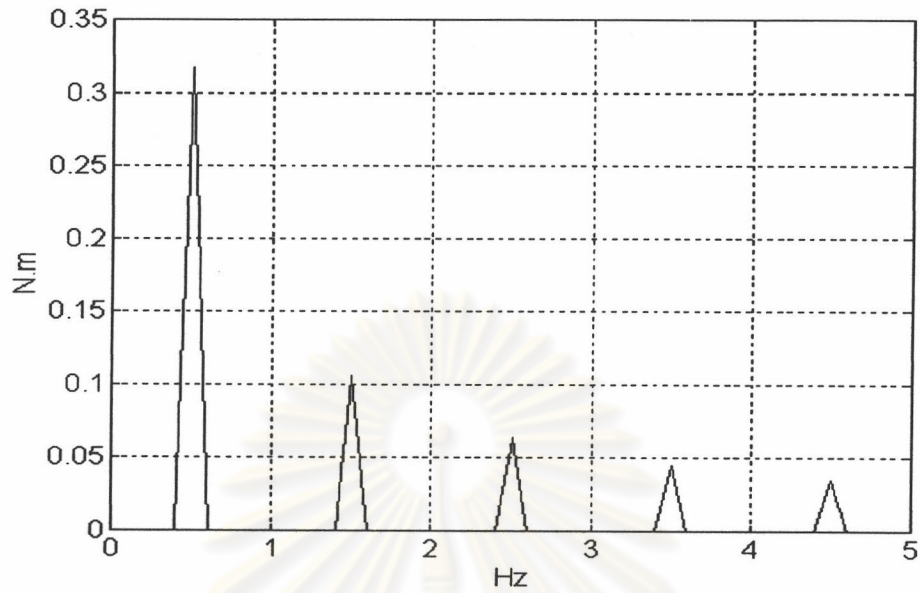
ระบบนั้นมีเพียง 1, 3, 5, ... Hz แต่จะไม่มีค่าที่ต่ำกว่า 1 Hz ดังแสดงในรูปที่ 6.2 นอกจากนี้ยังพบว่าฟังก์ชันโอนย้ายของระบบที่ประมวลได้จากการจำลองนั้นจะไม่มีเสถียรภาพ เนื่องจากสาเหตุที่ระบบที่เราหาลักษณะสมบัตินั้นมีโพลที่อยู่ใกล้กับแกนจินตภาพอยู่แล้ว ดังนั้นเมื่อเรากระตุ้นระบบได้ไม่ดีพอโอกาสที่จะทำให้การประมวลผลนั้นผิดพลาดไปก็มีค่อนข้างสูง

การทดสอบแบบที่ 6.2 : สัญญาณสี่เหลี่ยมความถี่ 0.5 Hz (ไม่ตรงกับความถี่เรโซแนนซ์)

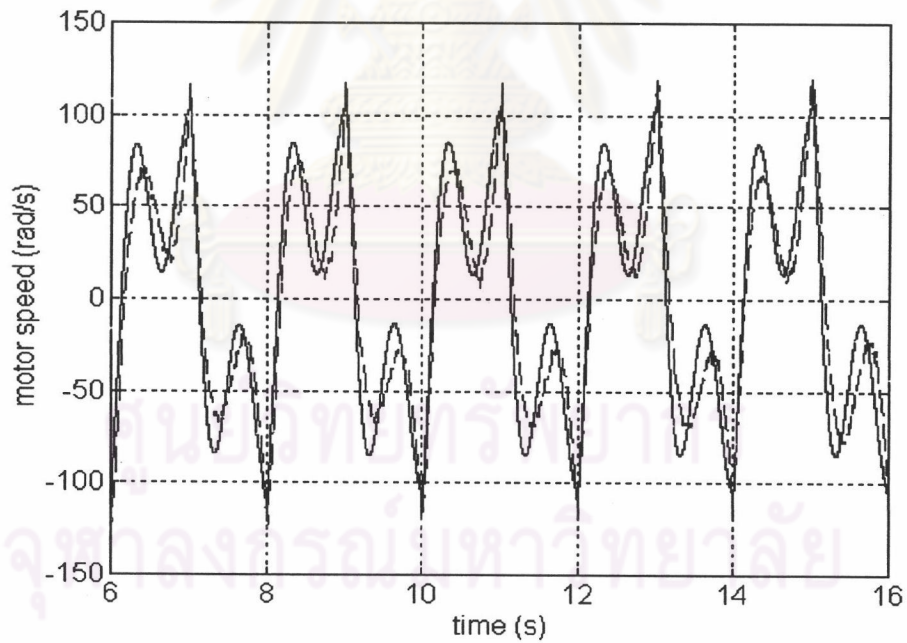
เมื่อป้อนแรงบิดของมอเตอร์เป็นสัญญาณสี่เหลี่ยมความถี่ 0.5 Hz ขนาด ± 0.5 N.m เพื่อกระตุ้นระบบ 2 มวลที่มีความถี่เรโซแนนซ์เป็น 1.03 Hz โดยใช้เวลาในการสุ่มตัวอย่างเป็น 0.1 s และเก็บข้อมูลเป็นเวลา 10 s หลังจากเริ่มป้อนสัญญาณเป็นเวลา 6 s จะได้ผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 6.5 ถึง 6.8



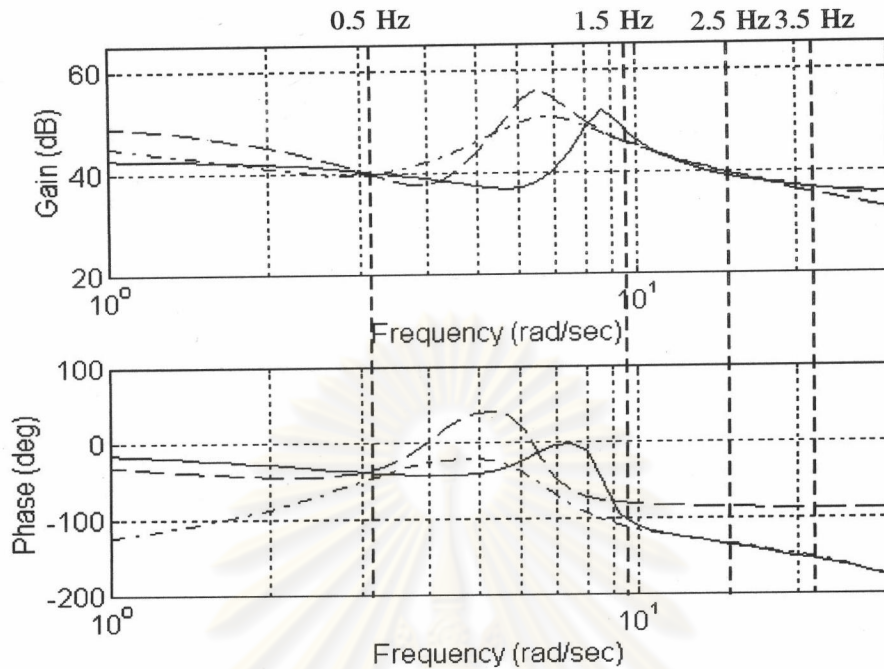
รูปที่ 6.5 แรงบิดของมอเตอร์ในการทดสอบแบบที่ 6.2



รูปที่ 6.6 สเปกตรัมของแรงบิดของมอเตอร์ในการทดสอบแบบที่ 6.2



รูปที่ 6.7 กราฟเปรียบเทียบความเร็วของมอเตอร์คำนวณจากระบบที่ประมาณได้จากการทดสอบ (เส้นทึบ) และความเร็วจริงของมอเตอร์ (เส้นประ) ในการทดสอบแบบที่ 6.2



รูปที่ 6.8 กราฟเปรียบเทียบอัตราขยายและมุมเฟสของระบบที่ประมาณได้จากการทดสอบ (เส้นทึบ) ระบบที่ประมาณได้จากการจำลอง (เส้นประ-จุด) และระบบจริง (เส้นประ) ในการทดสอบแบบที่ 6.2

โดยที่ ระบบจริงจะมีค่าฟังก์ชันโอนย้ายเป็น

$$P(z) = \frac{114.0994z^2 - 193.047z + 96.5839}{z^3 - 2.3733z^2 + 2.1886z - 0.7659}$$

$$P(s) = \frac{1250s^2 + 2083.33s + 20833.33}{s^3 + 2.667s^2 + 43.33s + 58.33}$$

ระบบที่ประมาณได้จากการจำลองจะมีค่าฟังก์ชันโอนย้ายเป็น

$$\hat{P}(z)_{sim} = \frac{1.829z^3 + 113.1z^2 - 189.3z + 86.33}{z^3 - 2.46z^2 + 2.251z - 0.8151}$$

$$\hat{P}(s)_{sim} = \frac{1.829s^3 + 1193s^2 + 3435s + 1.37 \times 10^4}{s^3 + 2.044s^2 + 42.08s - 27.25}$$

และระบบที่ประมาณได้จากการทดสอบจะมีค่าฟังก์ชันโอนย้ายเป็น

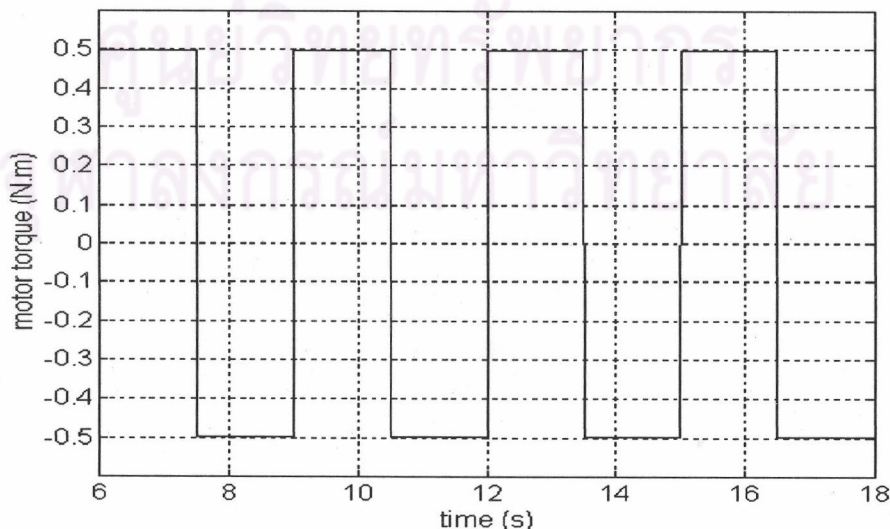
$$\hat{P}(z)_{exp} = \frac{-12.56z^3 + 109.2z^2 - 135z + 67.63}{z^3 - 1.921z^2 + 1.733z - 0.6054}$$

$$\hat{P}(s)_{\text{exp}} = \frac{-12.56s^3 + 896.6s^2 + 2460s + 3.962 \times 10^4}{s^3 + 5.019s^2 + 77.69s + 279.7}$$

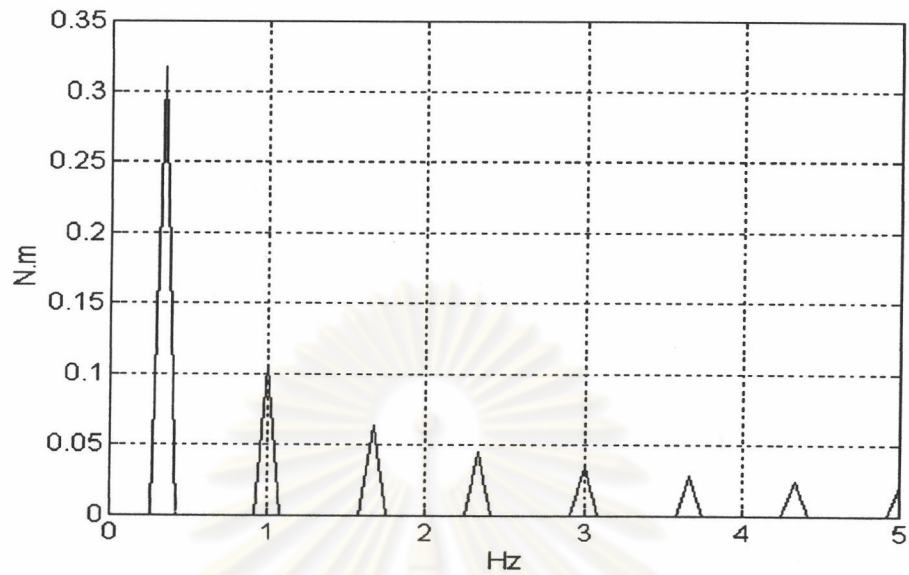
จากผลการทดสอบแบบที่ 6.2 ในรูปที่ 6.8 นั้นกราฟอัตราขยายและมุมเฟสของระบบที่ประมาณได้จากการทดสอบและระบบที่ประมาณได้จากการจำลองจะใกล้เคียงกับกราฟอัตราขยายและมุมเฟสของระบบจริงในบริเวณความถี่ 0.5, 1.5, 2.5 และ 3.5 Hz ซึ่งเป็นความถี่ที่เรากระตุ้นระบบนั่นเองโดยจะเห็นได้จากสเปกตรัมในรูปที่ 6.6 แต่เราจะไม่เห็นลักษณะสมบัติของการเรโซแนนซ์จากกราฟอัตราขยายและมุมเฟสของระบบที่ประมาณได้เนื่องจากเราไม่ได้กระตุ้นระบบที่ความถี่เรโซแนนซ์ซึ่งก็คือ 1 Hz อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าผลที่ได้จะให้ลักษณะสมบัติโดยรวมของระบบในแถบความถี่ที่เราสนใจแตกต่างจากค่าจริง แต่เรายังคงสามารถหาลักษณะสมบัติของระบบได้ตรงกับความถี่ที่เราได้กระตุ้นเข้าไป ดังจะเห็นได้จากความเร็วของมอเตอร์ที่ได้จากระบบที่ประมาณได้จะมีค่าที่ใกล้เคียงกับความเร็วจริงดังแสดงในรูปที่ 6.7

การทดสอบแบบที่ 6.3 : สัญญาณสี่เหลี่ยมความถี่ 0.33 Hz (ความถี่น้อยกว่าความถี่เรโซแนนซ์ 3 เท่า)

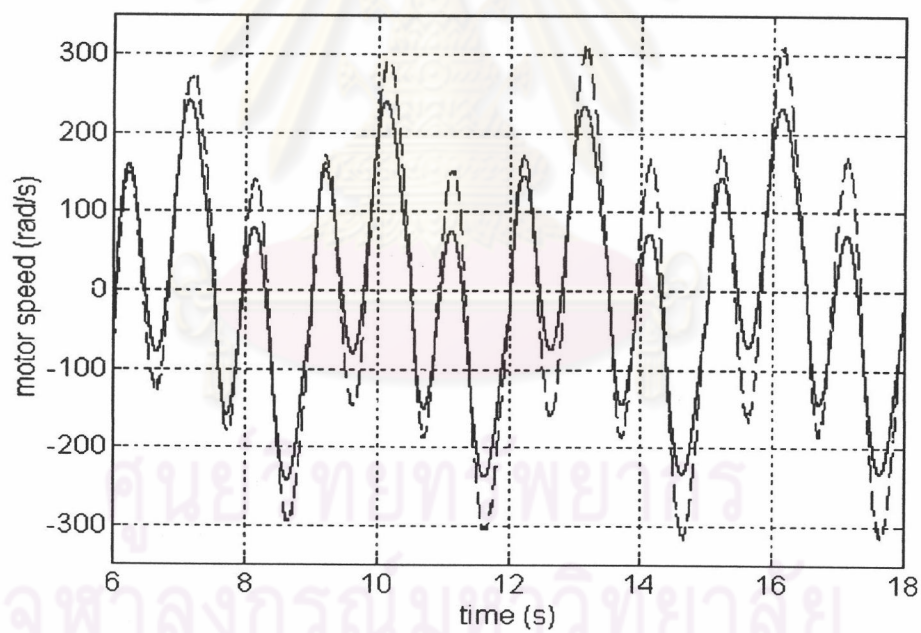
เมื่อป้อนแรงบิดของมอเตอร์เป็นสัญญาณสี่เหลี่ยมความถี่ 0.33 Hz ขนาด ± 0.5 N.m เพื่อกระตุ้นระบบ 2 มวลที่มีความถี่เรโซแนนซ์เป็น 1.03 Hz โดยใช้เวลาในการสุ่มตัวอย่างเป็น 0.1 s และเก็บข้อมูลเป็นเวลา 12 s หลังจากเริ่มป้อนสัญญาณเป็นเวลา 6 s จะได้ผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 6.9 ถึง 6.12



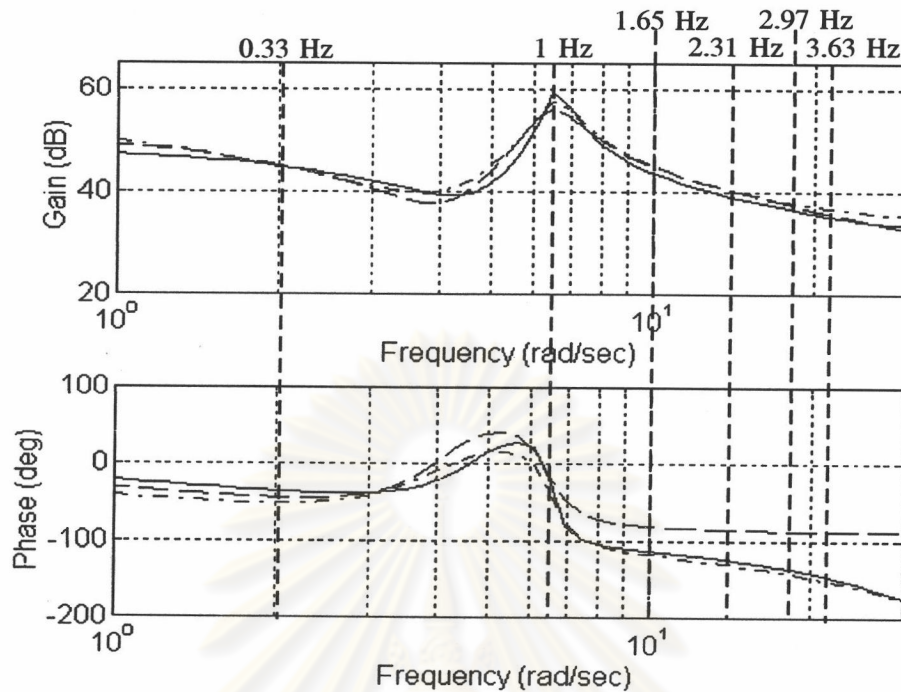
รูปที่ 6.9 แรงบิดของมอเตอร์ในการทดสอบแบบที่ 6.3



รูปที่ 6.10 สเปกตรัมของแรงบิดของมอเตอร์ในการทดสอบแบบที่ 6.3



รูปที่ 6.11 กราฟเปรียบเทียบความเร็วของมอเตอร์คำนวณจากระบบที่ประมาณได้จากการทดสอบ (เส้นทึบ) และความเร็วจริงของมอเตอร์ (เส้นประ) ในการทดสอบแบบที่ 6.3



รูปที่ 6.12 กราฟเปรียบเทียบอัตรายขยายและมุมเฟสของระบบที่ประมาณได้จากการทดสอบ (เส้นทึบ) ระบบที่ประมาณได้จากการจำลอง (เส้นประ-จุด) และระบบจริง (เส้นประ) ในการทดสอบแบบที่ 6.3

โดยที่ ระบบจริงจะมีค่าฟังก์ชันโอนย้ายเป็น

$$P(z) = \frac{114.0994z^2 - 193.047z + 96.5839}{z^3 - 2.3733z^2 + 2.1886z - 0.7659}$$

$$P(s) = \frac{1250s^2 + 2083.33s + 20833.33}{s^3 + 2.667s^2 + 43.33s + 58.33}$$

ระบบที่ประมาณได้จากการจำลองจะมีค่าฟังก์ชันโอนย้ายเป็น

$$\hat{P}(z)_{sim} = \frac{1.448z^3 + 110.1z^2 - 183z + 87.87}{z^3 - 2.409z^2 + 2.258z - 0.8118}$$

$$\hat{P}(s)_{sim} = \frac{1.448s^3 + 1174s^2 + 2898s + 1.89 \times 10^4}{s^3 + 2.085s^2 + 44.09s + 42.37}$$

และระบบที่ประมาณได้จากการทดสอบจะมีค่าฟังก์ชันโอนย้ายเป็น

$$\hat{P}(z)_{exp} = \frac{7.943z^3 + 82.44z^2 - 146.2z + 76.09}{z^3 - 2.338z^2 + 2.173z - 0.7567}$$

$$\hat{P}(s)_{\text{exp}} = \frac{7.943s^3 + 1108s^2 + 2637s + 2.414 \times 10^4}{s^3 + 2.788s^2 + 44.92s + 93.97}$$

จากผลการทดสอบแบบที่ 6.3 ในรูปที่ 6.12 นั้นกราฟอัตราขยายและมุมเฟสของระบบที่ประมาณได้จากการทดสอบและระบบที่ประมาณได้จากการจำลองจะใกล้เคียงกับกราฟอัตราขยายและมุมเฟสของระบบจริงจากการจำลองในบริเวณความถี่ 0.33, 1, 1.65, ... Hz ซึ่งเป็นความถี่ที่เรากระตุ้นระบบนั่นเอง โดยจะเห็นได้จากสเปกตรัมในรูปที่ 6.10 และเราจะเห็นถึงลักษณะสมบัติของการเรโซแนนซ์จากกราฟอัตราขยายและมุมเฟสของระบบที่ประมาณได้เนื่องจากเราได้กระตุ้นระบบที่ความถี่เรโซแนนซ์ซึ่งคือ 1 Hz รวมอยู่ด้วย

เมื่อเราพิจารณาจากผลของการทดสอบแบบที่ 6.1 - 6.3 แล้ว จะเห็นได้ว่าเมื่อเราใช้สัญญาณสี่เหลี่ยมเป็นสัญญาณค่านำแล้วจำนวนความถี่ที่ใช้ในการกระตุ้นระบบจะมีน้อย และถ้าเราต้องการที่จะกระตุ้นระบบให้ได้ลักษณะสมบัติของความถี่เรโซแนนซ์ของระบบนั้น เราจะต้องใช้ค่าความถี่ ω ที่ใกล้เคียงกับความถี่เรโซแนนซ์นั้น และควรที่จะให้ความถี่ ω มีค่าน้อยกว่าความถี่เรโซแนนซ์เป็นจำนวน 3 หรือ 5 เท่า จึงจะให้ผลของการหาลักษณะสมบัติของระบบโดยรวมที่ใกล้เคียงค่าจริงได้ แต่ในความเป็นจริงนั้นเราจะไม่สามารถทราบได้ว่าระบบนั้นมีความถี่เรโซแนนซ์เป็นเท่าใด เราจะทราบได้แต่เพียงว่าระบบนั้นมีแถบความถี่ในการทำงานในช่วงใดเท่านั้น จึงไม่เหมาะสมที่จะเลือกใช้สัญญาณสี่เหลี่ยมเพื่อกระตุ้นระบบ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

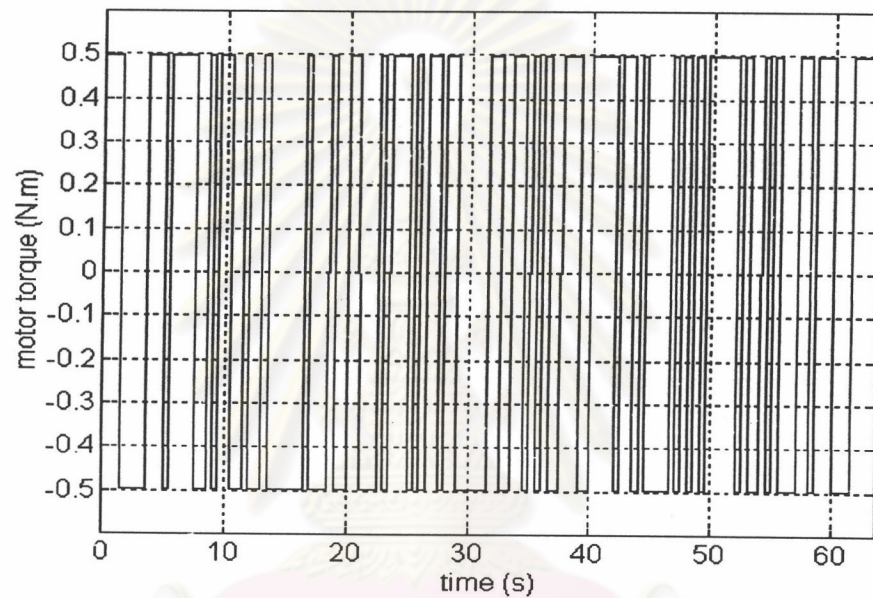
6.1.2 การใช้สัญญาณ Pseudo Random Binary Sequence (PRBS) เป็นสัญญาณด้านเข้า

สัญญาณ PRBS เป็นสัญญาณที่มีระดับสัญญาณ 2 ระดับเช่นเดียวกับสัญญาณสี่เหลี่ยม แต่ความกว้างของพัลส์จะมีการเปลี่ยนแปลงไปตลอดเวลาในลักษณะที่ไม่แน่นอน จึงทำให้มีความถี่ในการกระตุ้นอยู่ในช่วงตั้งแต่ 0 ถึง $1/t_{prbs}$ Hz ดังแสดงในรูปที่ ค.3 ในภาคผนวก ค โดยจะมีแถบความถี่ประสิทธิผลอยู่ในช่วง 0 ถึง $\frac{1}{3t_{prbs}}$ Hz (ภาคผนวก ค) ดังนั้นสัญญาณ PRBS ที่ใช้จึงควรมีค่าของแถบความถี่ 0 ถึง $\frac{1}{3t_{prbs}}$ Hz ครอบคลุมแถบความถี่หลักของระบบที่เราสนใจ จะหาลักษณะสมบัติ เพื่อให้มีพลังงานของสเปกตรัมที่กระตุ้นในบริเวณแถบความถี่หลักของระบบ มีขนาดสูงเพียงพอ ซึ่งจะทำให้เราสามารถประมวลผลหาลักษณะสมบัติของระบบได้ใกล้เคียงกับค่าจริงดังแสดงในสมการที่ (6.1) และเราจะต้องพิจารณาถึงความเป็นเรโซแนนซ์ของระบบด้วย โดยความกว้างของพัลส์ของสัญญาณส่วนใหญ่ควรมีค่ามากกว่าคาบของความถี่เรโซแนนซ์ของระบบเพื่อให้เรามีข้อมูลของความเป็นเรโซแนนซ์ของระบบสะท้อนออกมาทางด้านสัญญาณด้านออกได้อย่างเพียงพอ จึงจะทำให้เราสามารถหาลักษณะสมบัติของระบบได้อย่างถูกต้องขึ้น จะเห็นได้ว่าจากการที่สเปกตรัมของสัญญาณ PRBS มีความถี่ในการกระตุ้นเป็นช่วงกว้าง ทำให้เราสามารถกระตุ้นความถี่ได้กว้างและสามารถเลือกแถบความถี่ที่เราต้องการจะกระตุ้นให้ตรงกับระบบได้ง่าย ทำให้ผลในการหาลักษณะสมบัติของระบบที่ได้นั้นดีกว่าการที่จะใช้สัญญาณสี่เหลี่ยม ดังจะได้แสดงต่อไป โดยเราจะทำการทดสอบการหาลักษณะสมบัติของระบบโดยใช้สัญญาณด้านเข้าเป็นสัญญาณ PRBS ดังนี้

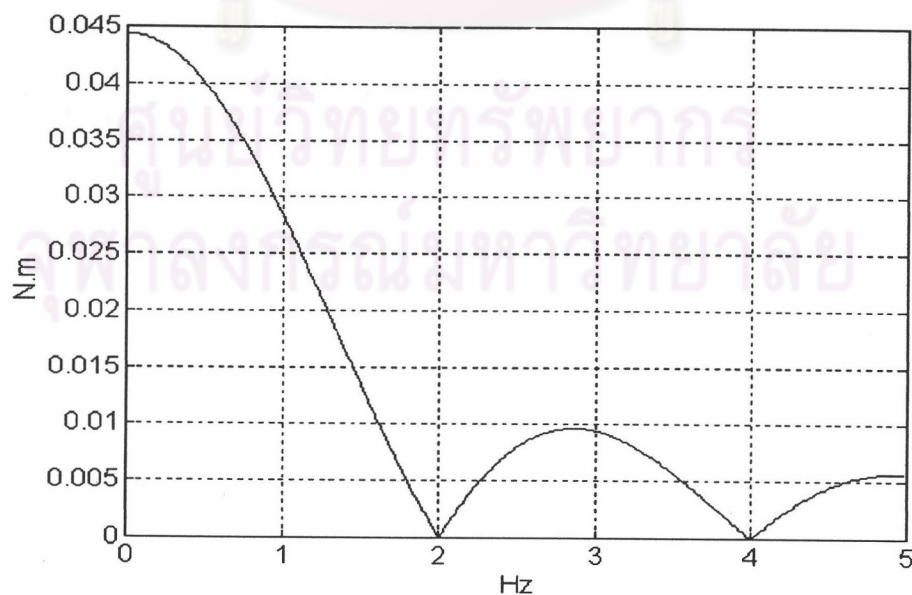
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การทดสอบแบบที่ 6.4 : สัญญาณ PRBS

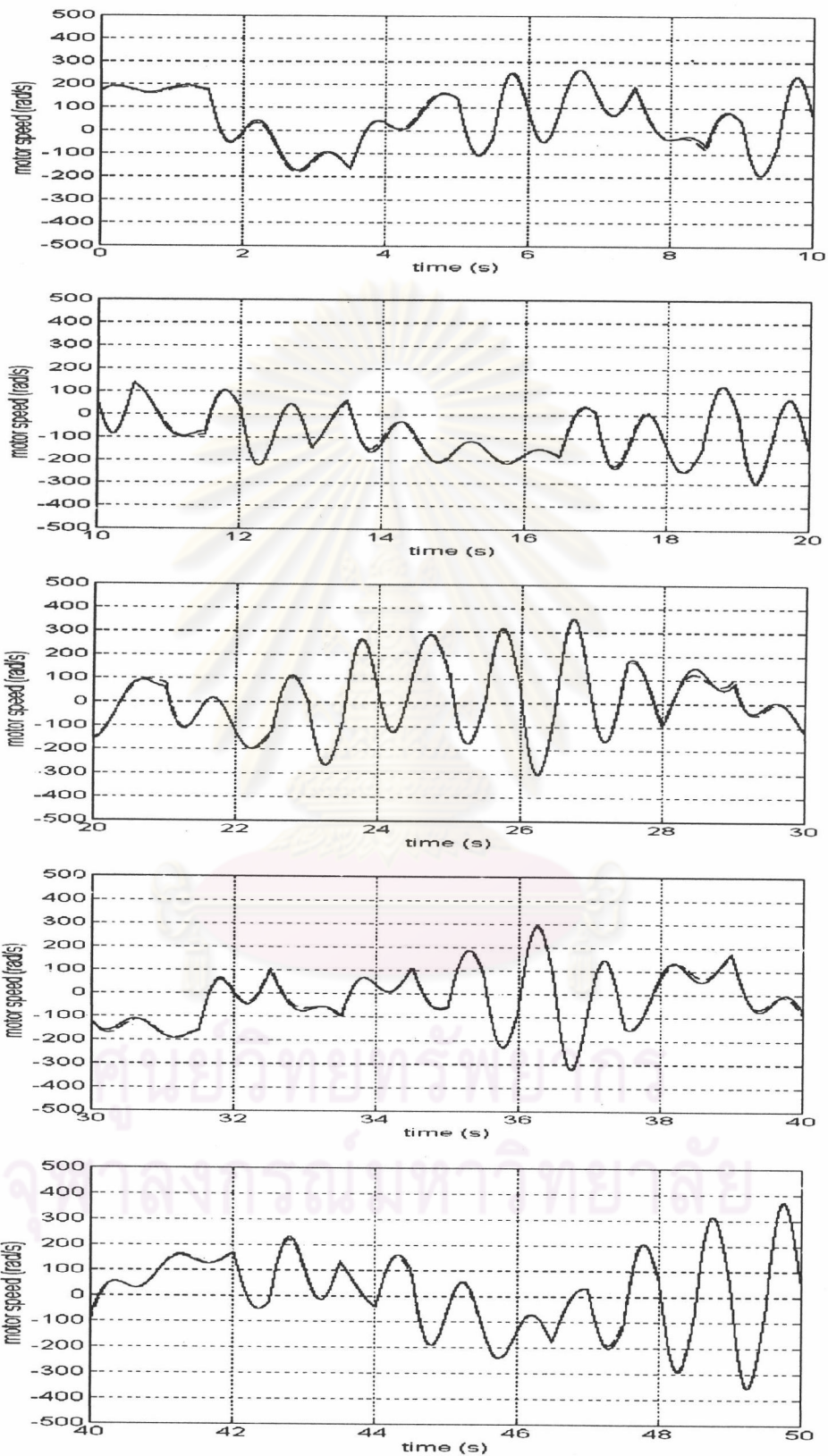
เมื่อป้อนแรงบิดของมอเตอร์เป็นสัญญาณ PRBS ที่มี $n = 7$ และ $t_{prbs} = 0.5$ s ขนาด ± 0.5 N.m เพื่อกระตุ้นระบบ 2 มวลที่มีความถี่เรโซแนนซ์เป็น 1.03 Hz โดยใช้เวลาในการสุ่มตัวอย่างเป็น 0.1 s และเก็บข้อมูลเท่ากับคาบเวลาของสัญญาณ PRBS คือ 63.5 s จะได้ผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 6.13 ถึง 6.17



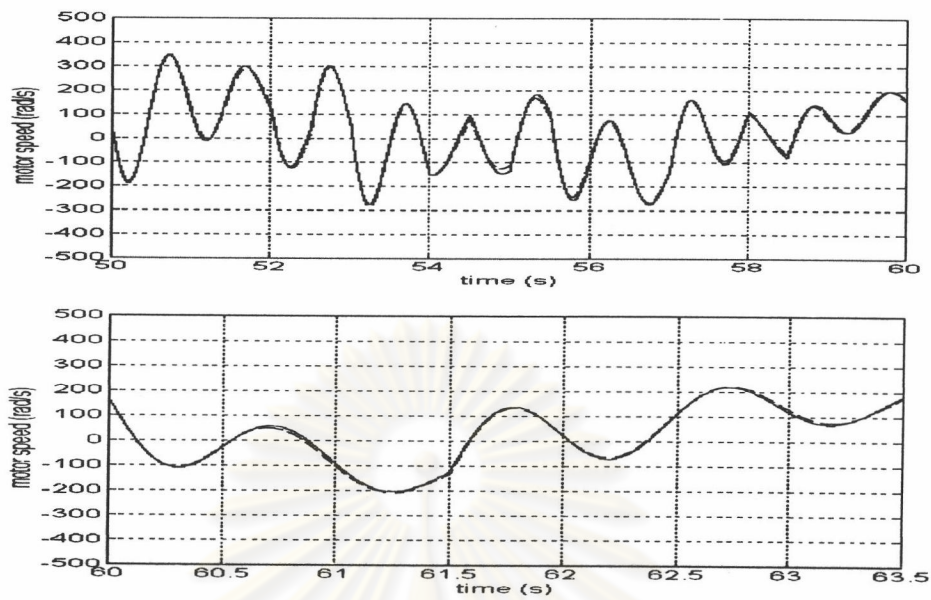
รูปที่ 6.13 แรงบิดของมอเตอร์ในการทดสอบแบบที่ 6.4



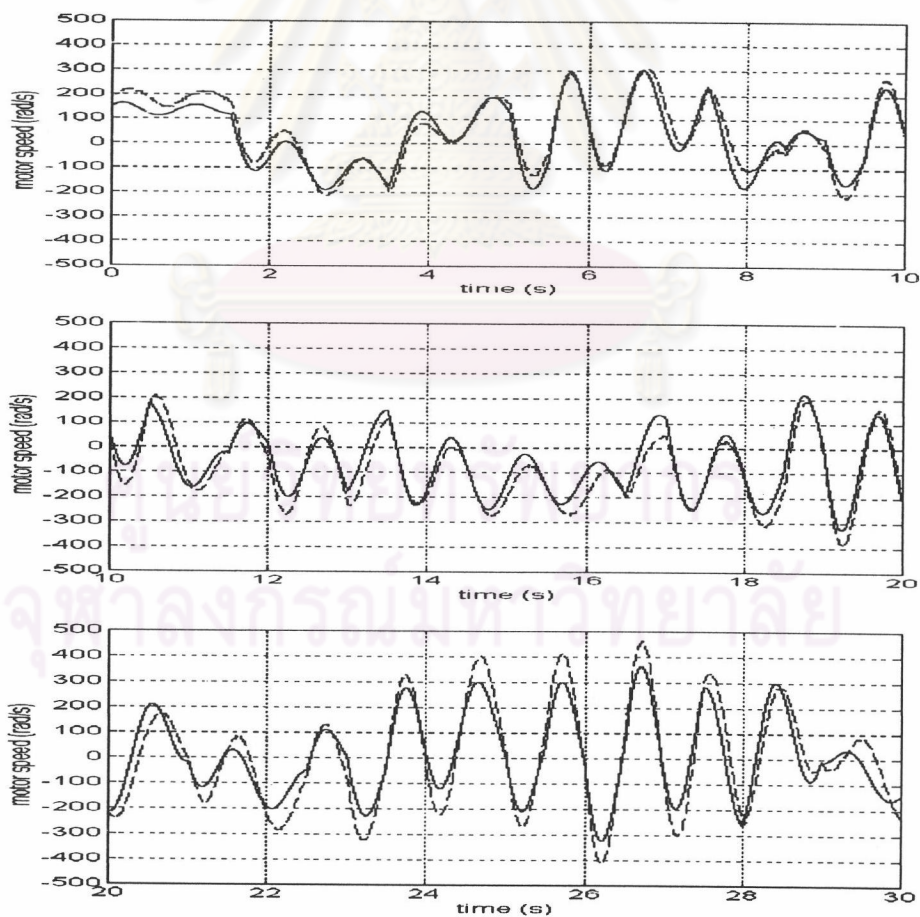
รูปที่ 6.14 สเปกตรัมของแรงบิดของมอเตอร์ในการทดสอบแบบที่ 6.4



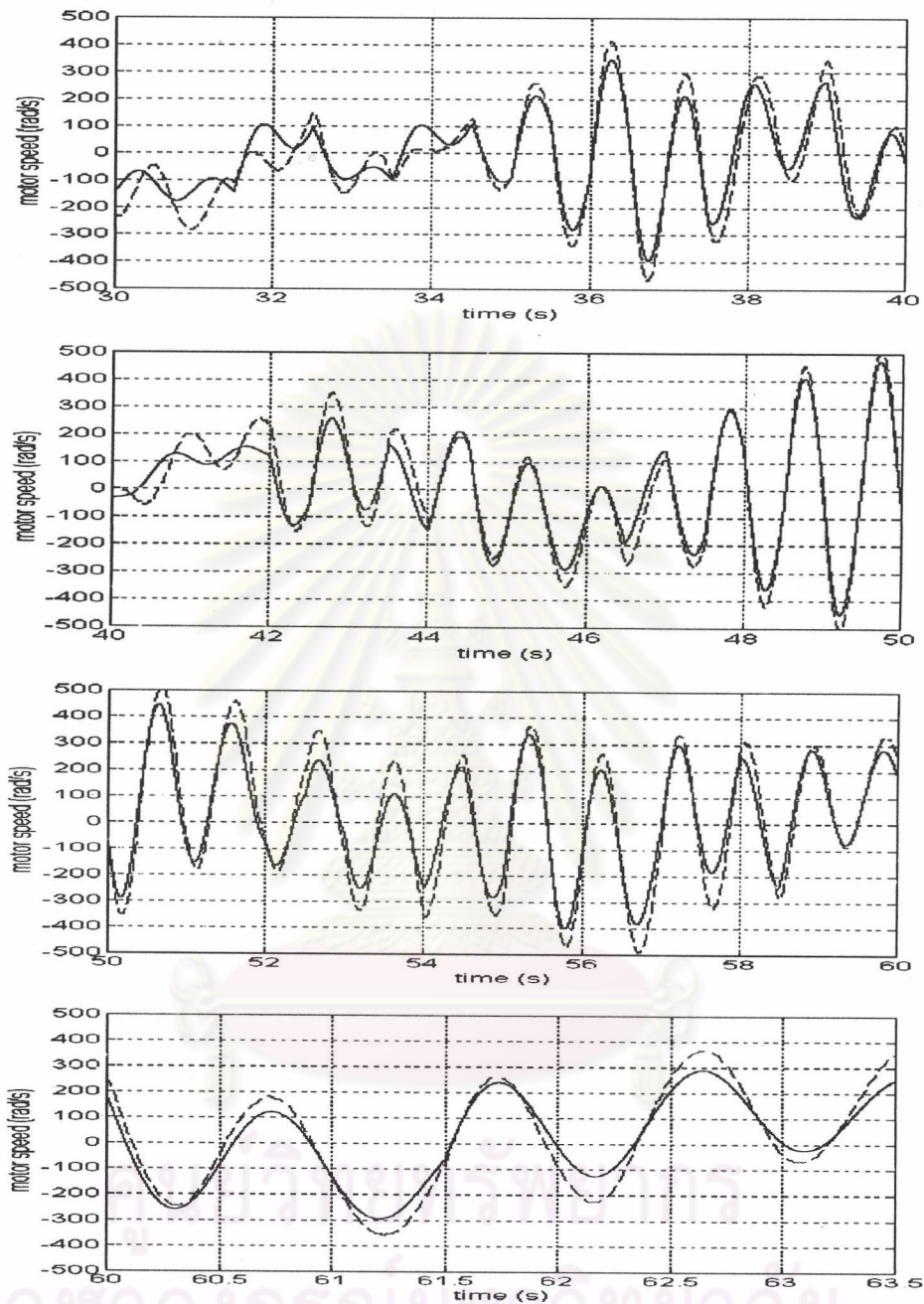
รูปที่ 6.15 กราฟเปรียบเทียบความเร็วของมอเตอร์คำนวณจากระบบที่ประมาณได้จากการจำลอง (เส้นทึบ) และความเร็วของมอเตอร์จากการจำลอง (เส้นประ) ในการทดสอบแบบที่ 6.4



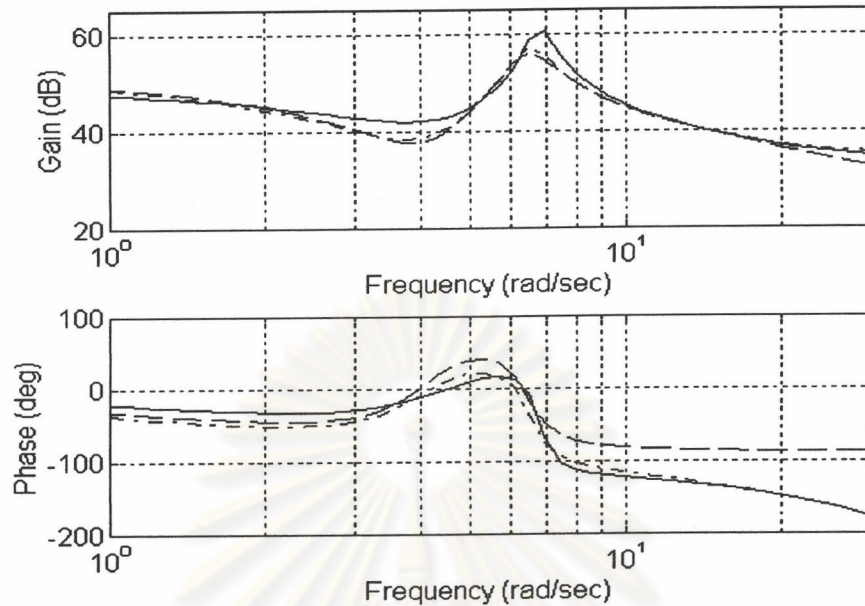
รูปที่ 6.15 (ต่อ) กราฟเปรียบเทียบความเร็วของมอเตอร์คำนวณจากระบบที่ประมาณได้จากการจำลอง (เส้นทึบ) และความเร็วของมอเตอร์จากการจำลอง (เส้นประ) ในการทดสอบแบบที่ 6.4



รูปที่ 6.16 กราฟเปรียบเทียบความเร็วของมอเตอร์คำนวณจากระบบที่ประมาณได้จากการทดสอบ (เส้นทึบ) และความเร็วจริงของมอเตอร์ (เส้นประ) ในการทดสอบแบบที่ 6.4



รูปที่ 6.16 (ต่อ) กราฟเปรียบเทียบความเร็วของมอเตอร์คำนวณจากระบบที่ประมาณได้จากการทดสอบ (เส้นทึบ) และความเร็วจริงของมอเตอร์ (เส้นประ) ในการทดสอบแบบที่ 6.4



รูปที่ 6.17 กราฟเปรียบเทียบอัตราขยายและมุมเฟสของระบบที่ประมาณได้จากการทดสอบ (เส้นทึบ) ระบบที่ประมาณได้จากการจำลอง (เส้นประ-จุด) และระบบจริง (เส้นประ) ในการทดสอบแบบที่ 6.4

โดยที่ ระบบจริงจะมีค่าฟังก์ชันโอนย้ายเป็น

$$P(z) = \frac{114.0994z^2 - 193.047z + 96.5839}{z^3 - 2.3733z^2 + 2.1886z - 0.7659}$$

$$P(s) = \frac{1250s^2 + 2083.33s + 20833.33}{s^3 + 2.667s^2 + 43.33s + 58.33}$$

ระบบที่ประมาณได้จากการจำลองจะมีค่าฟังก์ชันโอนย้ายเป็น

$$\hat{P}(z)_{sim} = \frac{-0.4014z^3 + 111.1z^2 - 184.4z + 89.94}{z^3 - 2.397z^2 + 2.237z - 0.7963}$$

$$\hat{P}(s)_{sim} = \frac{-0.4014s^3 + 1164s^2 + 2375s + 1.886 \times 10^4}{s^3 + 2.278s^2 + 43.73s + 50.5}$$

และระบบที่ประมาณได้จากการทดสอบจะมีค่าฟังก์ชันโอนย้ายเป็น

$$\hat{P}(z)_{exp} = \frac{4.172z^3 + 106.1z^2 - 168.8z + 79.4}{z^3 - 2.322z^2 + 2.166z - 0.7667}$$

$$\hat{P}(s)_{\text{exp}} = \frac{4.172s^3 + 1184s^2 + 4162s + 2.472 \times 10^4}{s^3 + 2.657s^2 + 47.93s + 90.8}$$

จากผลในการทดสอบแบบที่ 6.4 จะเห็นได้ว่าเมื่อเราใช้สัญญาณ PRBS ซึ่งมีความถี่กระตุ้นในช่วง 0 - 2 Hz ดังแสดงในรูปที่ 6.17 จะให้กราฟอัตราขยายและมุมเฟส และฟังก์ชันโอนย้ายของระบบที่ประมาณได้ใกล้เคียงกับระบบจริงที่ควรได้

ดังนั้นเราจะเห็นได้ว่าการใช้สัญญาณ PRBS เป็นสัญญาณด้านเข้าทำให้เราสามารถที่จะกระตุ้นความถี่ได้เป็นช่วงกว้างและสามารถที่จะเลือกแถบความถี่ที่เราต้องการจะกระตุ้นให้ตรงกับระบบได้ง่าย ทำให้ผลในการหาลักษณะสมบัติของระบบที่ได้นั้นดีกว่าการใช้สัญญาณสี่เหลี่ยม



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

6.2 เงื่อนไขในการเลือกค่าพารามิเตอร์ของสัญญาณ PRBS ที่ใช้เป็นสัญญาณด้านเข้า

สำหรับค่าพารามิเตอร์ของสัญญาณ PRBS ที่เราจะพิจารณาได้แก่ จำนวนเซลล์ของรีจิสเตอร์เลื่อนข้อมูล (n) และเวลาในการเลื่อนข้อมูล (t_{prbs}) ซึ่งมีความสำคัญต่อการหาลักษณะสมบัติของระบบดังนี้

6.2.1 เงื่อนไขในการเลือกเวลาในการเลื่อนข้อมูล (t_{prbs}) ของสัญญาณ PRBS

เนื่องจากแถบความถี่ของสัญญาณ PRBS ที่กระตุ้นระบบได้ค่านั้นจะอยู่ในช่วง $0 - 1/t_{prbs}$ Hz ดังนั้นเราจึงควรที่จะเลือก t_{prbs} ให้มีแถบความถี่ของสัญญาณ PRBS ครอบคลุมแถบความถี่หลักของระบบที่เราสนใจ แต่ก็ไม่ควรมีค่ามากเกินไปนัก เนื่องจากพลังงานของสเปกตรัมจะกระจายมากเกินไปจนมีค่าความถี่ไม่มากพอที่จะกระตุ้นระบบในช่วงความถี่ที่เราสนใจ โดยจะพิจารณาได้จากความหนาแน่นเชิงสเปกตรัมของพลังงานของสัญญาณ PRBS ในรูปที่ ค.3 ในภาคผนวก ค เราจะเห็นได้ว่าความถี่หลักมูลของสัญญาณ PRBS มีค่าเท่ากับ $\frac{1}{Nt_{prbs}}$ เมื่อ N คือความยาวสูงสุดของลำดับของสัญญาณ PRBS ซึ่งมีค่าเท่ากับ $2^n - 1$ ดังนั้นในกรณีที่เราให้ n มีค่าคงที่ถ้าเราใช้ค่าของ t_{prbs} น้อย กล่าวคือมีแถบความถี่ของสัญญาณกว้าง จำนวนความถี่ที่กระตุ้นในแถบความถี่หลักของระบบที่เราสนใจจะมีค่าน้อย แต่ถ้าเราใช้ค่าของ t_{prbs} มากขึ้นโดยที่แถบความถี่ของสัญญาณแคบลงแต่ยังคงครอบคลุมแถบความถี่หลักของระบบที่เราสนใจจำนวนความถี่ที่กระตุ้นในแถบความถี่ของระบบที่เราสนใจจะมีค่ามากขึ้นซึ่งจะทำให้การหาลักษณะสมบัติมีประสิทธิผลมากขึ้น โดยเราจะทำการทดสอบแบบที่ 6.5 เพื่อสนับสนุนสมมุติฐานข้างต้น

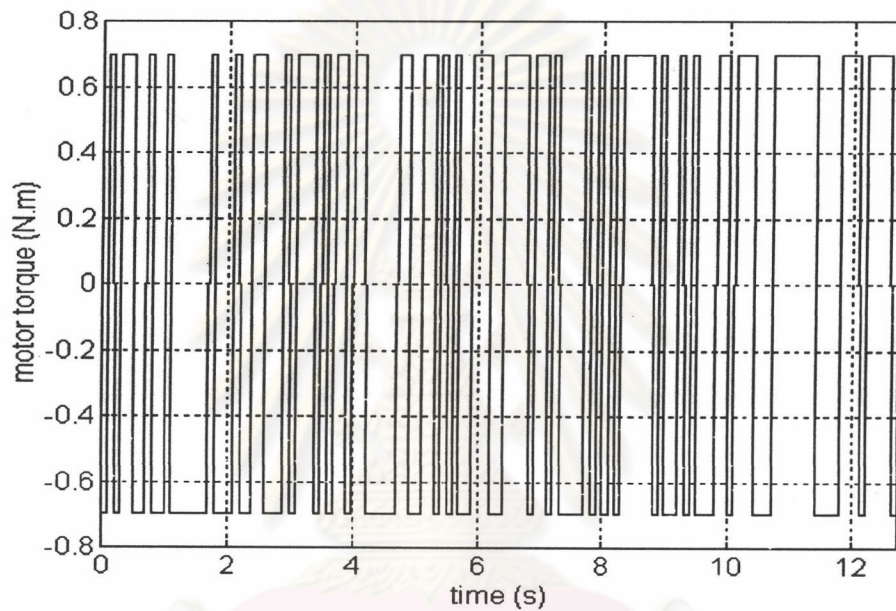
นอกจากนี้เราควรจะใช้ค่าของ t_{prbs} ให้มีค่ามากกว่าเวลาประวิงที่มีอยู่ในมอเตอร์แบบเซอร์โว (ประมาณ 5 ms) มากๆ เพื่อจะลดผลกระทบที่เกิดจากเวลาประวิง T_d ในระบบให้น้อยลง เราจึงสามารถสรุปเงื่อนไขในการกำหนดค่า t_{prbs} ได้ดังนี้คือ

$$T_d \ll t_{prbs} \lesssim \frac{1}{f_{resonant}} \quad (6.2)$$

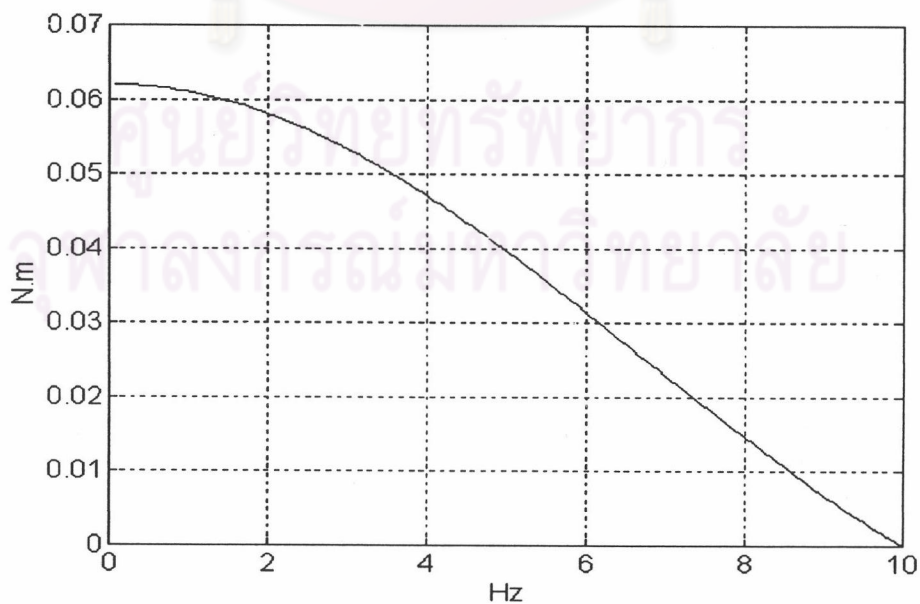
เราจะทำการทดสอบแบบที่ 6.6 เพื่อสนับสนุนข้อสรุปนี้

การทดสอบแบบที่ 6.5 : $t_{prbs} = 0.1$ s

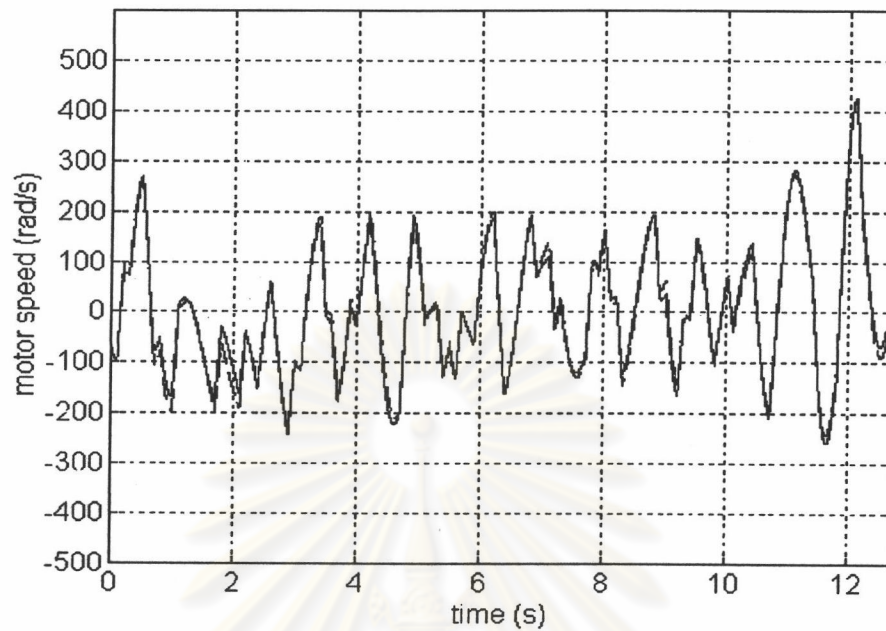
เมื่อป้อนแรงบิดของมอเตอร์เป็นสัญญาณ PRBS ที่มี $n = 7$ และ $t_{prbs} = 0.1$ s ขนาด ± 0.7 N.m เพื่อกระตุ้นระบบ 2 มวลที่มีความถี่เรโซแนนซ์เป็น 1.03 Hz โดยใช้เวลาในการสุ่มตัวอย่างเป็น 0.1 s และเก็บข้อมูลเท่ากับคาบเวลาของสัญญาณ PRBS คือ 12.7 s จะได้ผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 6.18 ถึง 6.22



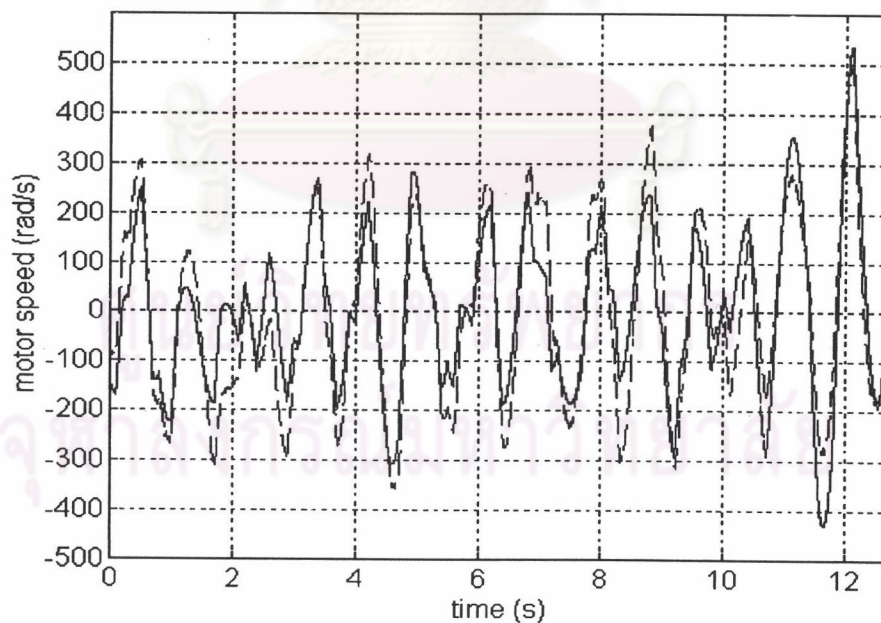
รูปที่ 6.18 แรงบิดของมอเตอร์ในการทดสอบแบบที่ 6.5



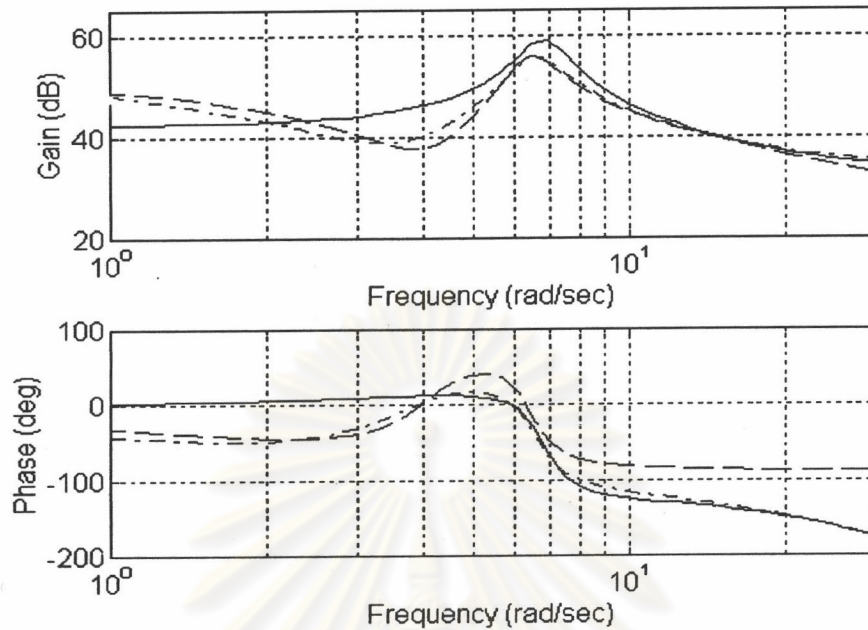
รูปที่ 6.19 สเปกตรัมของแรงบิดของมอเตอร์ในการทดสอบแบบที่ 6.5



รูปที่ 6.20 กราฟเปรียบเทียบความเร็วของมอเตอร์คำนวณจากระบบที่ประมาณได้จากการจำลอง (เส้นทึบ) และความเร็วของมอเตอร์จากการจำลอง (เส้นประ) ในการทดสอบแบบที่ 6.5



รูปที่ 6.21 กราฟเปรียบเทียบความเร็วของมอเตอร์คำนวณจากระบบที่ประมาณได้จากการทดสอบ (เส้นทึบ) และความเร็วจริงของมอเตอร์ (เส้นประ) ในการทดสอบแบบที่ 6.5



รูปที่ 6.22 กราฟเปรียบเทียบอัตราขยายและมุมเฟสของระบบที่ประมาณได้จากการทดสอบ (เส้นทึบ) ระบบที่ประมาณได้จากการจำลอง (เส้นประ-จุด) และระบบจริง (เส้นประ) ในการทดสอบแบบที่ 6.5

โดยที่ ระบบจริงจะมีค่าฟังก์ชันโอนย้ายเป็น

$$P(z) = \frac{114.0994z^2 - 193.047z + 96.5839}{z^3 - 2.3733z^2 + 2.1886z - 0.7659}$$

$$P(s) = \frac{1250s^2 + 2083.33s + 20833.33}{s^3 + 2.667s^2 + 43.33s + 58.33}$$

ระบบที่ประมาณได้จากการจำลองจะมีค่าฟังก์ชันโอนย้ายเป็น

$$\hat{P}(z)_{sim} = \frac{0.03076z^3 + 111z^2 - 183.9z + 86.13}{z^3 - 2.392z^2 + 2.218z + 0.793}$$

$$\hat{P}(s)_{sim} = \frac{0.03076s^3 + 1159s^2 + 2902s + 1.534 \times 10^4}{s^3 + 2.32s^2 + 44.635s + 38.74}$$

และระบบที่ประมาณได้จากการทดสอบจะมีค่าฟังก์ชันโอนย้ายเป็น

$$\hat{P}(z)_{exp} = \frac{5.107z^3 + 109.2z^2 - 138.8z + 47.64}{z^3 - 2.039z^2 + 1.727z - 0.5129}$$

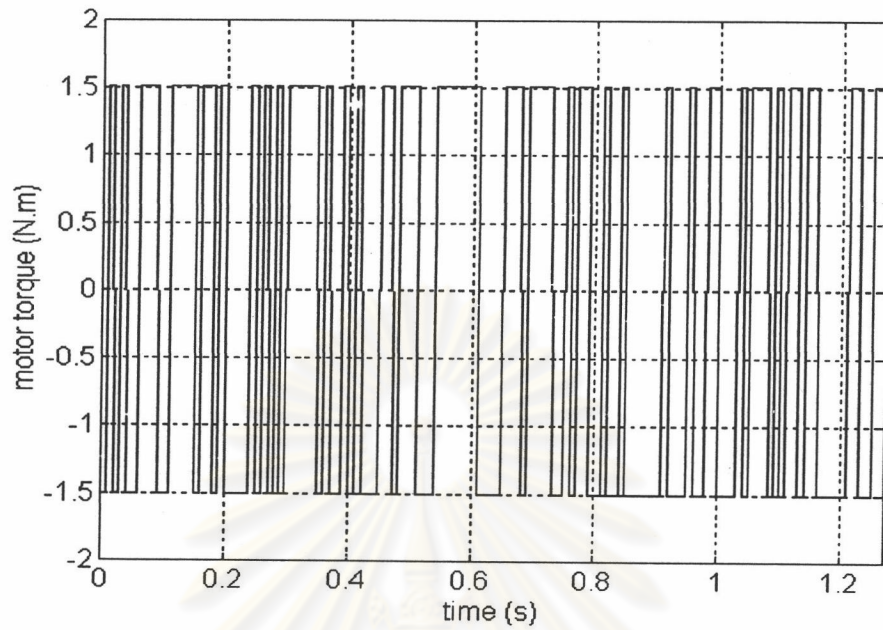
$$\hat{P}(s)_{\text{exp}} = \frac{5.107s^3 + 1197s^2 + 1.029 \times 10^4 s + 3.319 \times 10^4}{s^3 + 6.678s^2 + 54.05s + 251}$$

จากผลการทดสอบแบบที่ 6.5 ในรูปที่ 6.22 นั้นกราฟอัตราขยายและมุมเฟสของระบบที่ประมาณได้ผิดพลาดไปจากระบบจริงค่อนข้างมากในช่วงความถี่ที่ต่ำกว่า 1 Hz ทั้งนี้เนื่องมาจากความถี่หลักมูลของสัญญาณ PRBS ที่มี $n=7$ และ $t_{\text{prbs}}=0.1$ s มีค่าเป็น $\frac{1}{(2^7 - 1) \times 0.1} \approx 0.079$ Hz ดังนั้นจำนวนความถี่ที่กระตุ้นในช่วง 0-1 Hz จึงมีน้อย แต่เมื่อเราพิจารณาเปรียบเทียบกับผลในการทดสอบแบบที่ 6.4 ในรูปที่ 6.17 ซึ่งจะพบว่าให้กราฟอัตราขยายและมุมเฟสของระบบที่ประมาณได้ใกล้เคียงกับระบบจริงค่อนข้างมากในช่วงด้านความถี่ที่ต่ำกว่า 1 Hz ทั้งนี้เนื่องมาจากความถี่หลักมูลของสัญญาณ PRBS ที่มี $n=7$ และ $t_{\text{prbs}}=0.5$ s มีค่าเป็น $\frac{1}{(2^7 - 1) \times 0.5} \approx 0.016$ Hz ดังนั้นจำนวนความถี่ที่กระตุ้นในช่วง 0-1 Hz จึงมีมากกว่าการใช้สัญญาณ PRBS ที่มี $n=7$ และ $t_{\text{prbs}}=0.1$ s ถึง 5 เท่าจึงทำให้ได้ผลของการหาลักษณะสมบัติของระบบที่ดีกว่า

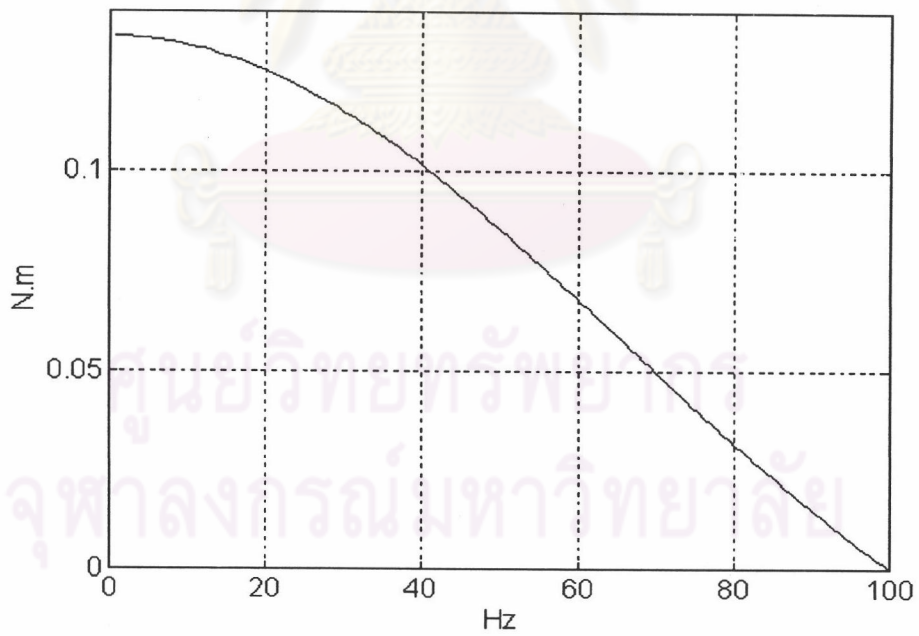
การทดสอบแบบที่ 6.6 : $t_{\text{prbs}} = 0.01$ s

เมื่อป้อนแรงบิดของมอเตอร์เป็นสัญญาณ PRBS ที่มี $n = 7$ และ $t_{\text{prbs}} = 0.01$ s ขนาด ± 0.7 N.m เพื่อกระตุ้นระบบ 2 มวลที่มีความถี่เรโซแนนซ์เป็น 1.03 Hz โดยใช้เวลาในการสุ่มตัวอย่างเป็น 0.01 s และเก็บข้อมูลเท่ากับคาบเวลาของสัญญาณ PRBS คือ 1.27 s จะได้ผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 6.23 ถึง 6.27

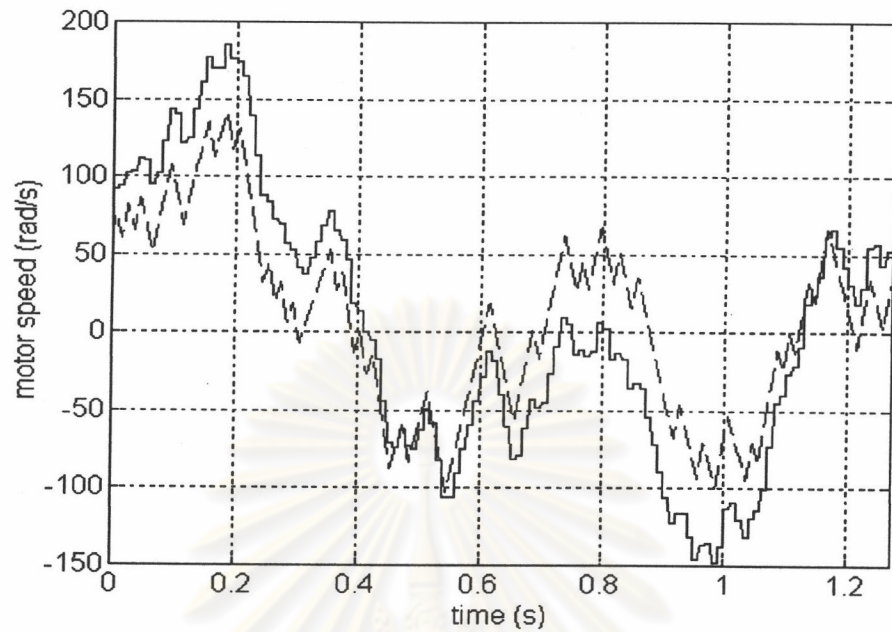
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



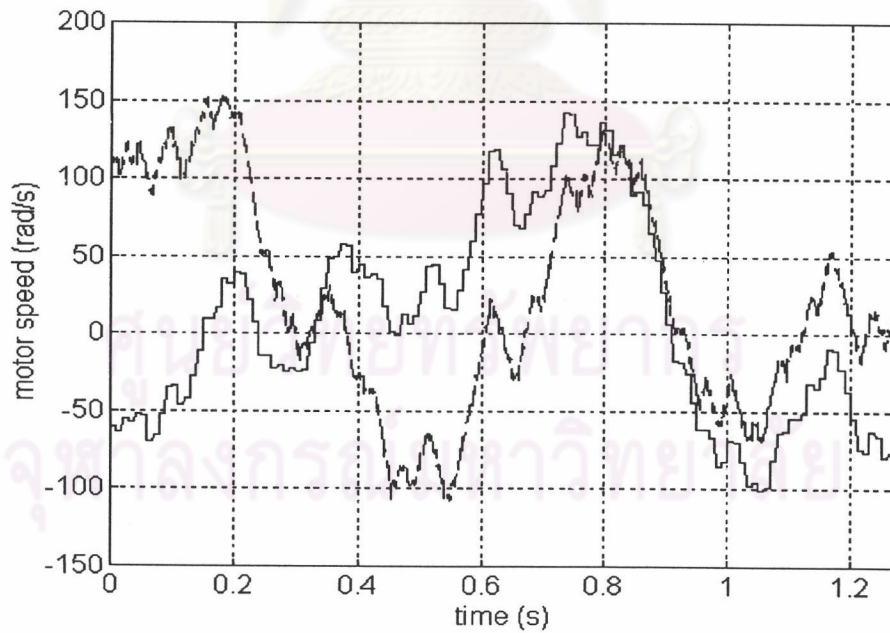
รูปที่ 6.23 แรงบิดของมอเตอร์ในการทดสอบแบบที่ 6.6



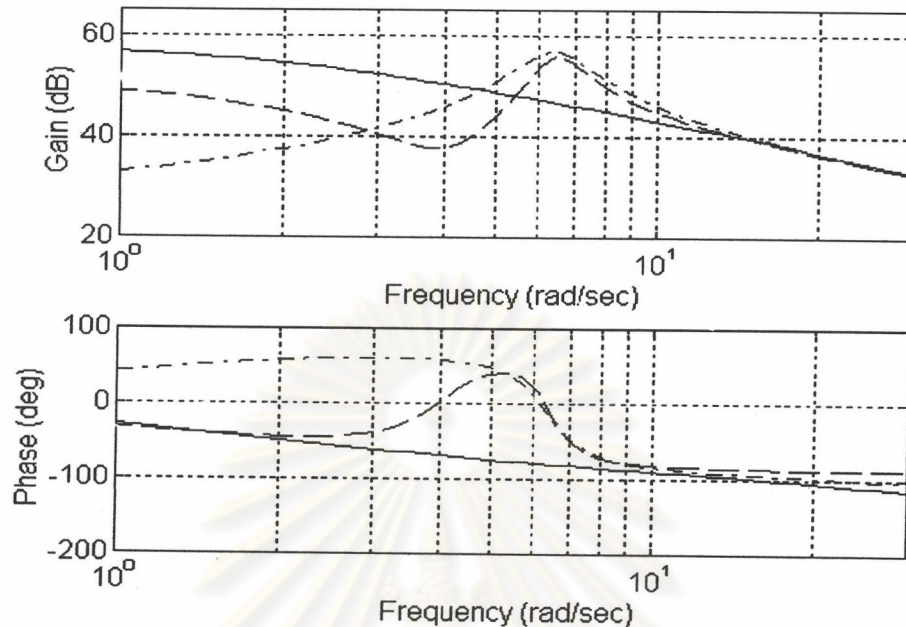
รูปที่ 6.24 สเปกตรัมของแรงบิดของมอเตอร์ในการทดสอบแบบที่ 6.6



รูปที่ 6.25 กราฟเปรียบเทียบความเร็วของมอเตอร์คำนวณจากระบบที่ประมาณได้จากการจำลอง (เส้นทึบ) และความเร็วของมอเตอร์จากการจำลอง (เส้นประ) ในการทดสอบแบบที่ 6.6



รูปที่ 6.26 กราฟเปรียบเทียบความเร็วของมอเตอร์คำนวณจากระบบที่ประมาณได้จากการทดสอบ (เส้นทึบ) และความเร็วจริงของมอเตอร์ (เส้นประ) ในการทดสอบแบบที่ 6.6



รูปที่ 6.27 กราฟเปรียบเทียบอัตราขยายและมุมเฟสของระบบที่ประมาณได้จากการทดสอบ (เส้นทึบ) ระบบที่ประมาณได้จากการจำลอง (เส้นประ-จุด) และระบบจริง (เส้นประ) ในการทดสอบแบบที่ 6.6

โดยที่ ระบบจริงจะมีค่าฟังก์ชันโอนย้ายเป็น

$$P(z) = \frac{12.4325z^2 - 24.639z + 12.227}{z^3 - 2.9694z^2 + 2.9431z - 0.9737}$$

$$P(s) = \frac{1250s^2 + 2083.33s + 20833.33}{s^3 + 2.667s^2 + 43.33s + 58.33}$$

ระบบที่ประมาณได้จากการจำลองจะมีค่าฟังก์ชันโอนย้ายเป็น

$$\hat{P}(z)_{sim} = \frac{-0.007876z^3 + 7.474z^2 - 2.429z - 4.913}{z^3 - 1.976z^2 + 0.9786z + 0.001913}$$

$$\hat{P}(s)_{sim} = \frac{-0.007876s^3 - 1857s^2 + 7.749 \times 10^5 s + 7.81 \times 10^5}{s^3 + 625.9s^2 + 1142s + 2.547 \times 10^4}$$

และระบบที่ประมาณได้จากการทดสอบจะมีค่าฟังก์ชันโอนย้ายเป็น

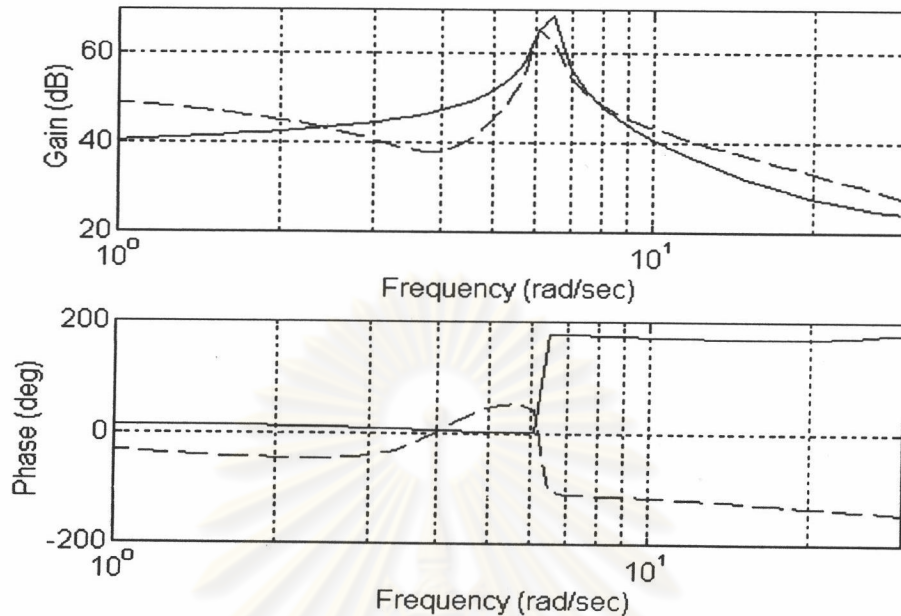
$$\hat{P}(z)_{exp} = \frac{-0.4593z^3 + 6.441z^2 + 4.846z - 1.051}{z^3 - 0.9669z^2 - 0.3581z + 0.3378}$$

$$\hat{P}(s)_{\text{exp}} = \frac{-0.4593s^3 + 379.1s^2 + 1.013 \times 10^5 s + 4.187 \times 10^6}{s^3 + 108.5s^2 + 3045s + 5469}$$

จากผลการทดสอบแบบที่ 6.6 ในรูปที่ 6.27 นั้นกราฟอัตราขยายและมุมเฟสของระบบที่ประเมินได้ผิดพลาดไปจากระบบจริงจากการจำลองค่อนข้างมาก ทั้งนี้เนื่องมาจากสัญญาณ PRBS มีค่า t_{prbs} เป็น 0.01 s ซึ่งใกล้เคียงกับเวลาประวิงในระบบซึ่งมีค่าประมาณ 5 ms ทำให้ผลกระทบที่เกิดจากเวลาประวิงมีค่อนข้างสูง และยังมีสาเหตุอื่นๆมาประกอบด้วย ได้แก่เราต้องใช้เวลาในการสุ่มตัวอย่างเป็น 0.01 s ซึ่งใกล้เคียงกับเวลาประวิง เนื่องจากเวลาในการสุ่มตัวอย่างไม่ควรมีค่ามากกว่า t_{prbs} และเมื่อพิจารณาถึงการกระจายของสเปกตรัมของสัญญาณ PRBS ที่มี $n=7$ และ $t_{\text{prbs}}=0.01$ s จะพบมีค่าความถี่หลักมูลของสัญญาณเป็น $\frac{1}{(2^7 - 1) \times 0.01} \approx 0.79$ Hz ทำให้เรามีจำนวนความถี่ที่กระตุ้นในแถบความถี่ของระบบน้อยมาก

นอกจากนี้ความกว้างของพัลส์โดยส่วนใหญ่ของสัญญาณ PRBS ที่มี $n=7$ และ $t_{\text{prbs}}=0.01$ s มีค่าน้อยกว่าคาบของความถี่เรโซแนนซ์ของระบบซึ่งคือ 1 s มาก (ความกว้างพัลส์สูงสุดของสัญญาณเท่ากับ 0.07 s) ทำให้เรามีข้อมูลของความเป็นเรโซแนนซ์ของระบบน้อย ดังนั้นเราจึงไม่สามารถที่จะหาลักษณะสมบัติของเรโซแนนซ์ของระบบได้ตรง

เราอาจเห็นผลกระทบจากเวลาประวิงในการทดสอบแบบที่ 6.6 ได้ไม่เด่นชัด เนื่องจากมีผลกระทบอื่น ๆ เข้ามาประกอบดังได้กล่าวไว้ข้างต้น ดังนั้นเราจึงจำลองระบบโดยการป้อนแรงบิดของมอเตอร์เป็นสัญญาณ PRBS ที่มี $n = 7$ และ $t_{\text{prbs}} = 0.5$ s ขนาด ± 0.5 N.m เพื่อกระตุ้นระบบ 2 มวลที่มีความถี่เรโซแนนซ์เป็น 1.03 Hz โดยใช้เวลาในการสุ่มตัวอย่างเป็น 0.1 s และเก็บข้อมูลเท่ากับคาบเวลาของสัญญาณ PRBS คือ 12.7 s ดังเช่นการทดสอบแบบที่ 6.4 ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมอยู่แล้ว แต่เปลี่ยนค่าเวลาประวิงจาก 5 ms เป็น 50 ms เพื่อให้ใกล้เคียงกับค่า $t_{\text{prbs}}=0.5$ s ดังจะได้ผลการจำลองในรูปที่ 6.28 แต่เราไม่สามารถที่จะทำการทดสอบจริงได้เนื่องจากเวลาประวิงที่มีอยู่ในระบบทดสอบเป็นเวลาประวิงที่มีอยู่ในมอเตอร์แบบเซอร์โวซึ่งเราไม่สามารถที่จะเปลี่ยนแปลงค่าได้ จากผลการจำลองในรูปที่ 6.28 นั้นกราฟอัตราขยายและมุมเฟสของระบบที่ประมาณได้จากการจำลองจะมีค่าผิดพลาดจากระบบจริงค่อนข้างสูง ดังนั้นเราจะเห็นได้ว่าผลกระทบจากเวลาประวิงซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ t_{prbs} จะมีผลต่อการหาลักษณะสมบัติได้ผิดพลาดจากค่าจริงค่อนข้างสูง



รูปที่ 6.28 กราฟเปรียบเทียบอัตราขยายและมุมเฟสของระบบที่ประมาณได้จากการจำลอง (เส้นทึบ) และระบบจริง (เส้นประ) ในการจำลองโดยป้อนแรงบิดของมอเตอร์เป็นสัญญาณ PRBS ที่มี $n = 7$ และ $t_{prbs} = 0.5$ s ขนาด ± 0.5 N.m เพื่อกระตุ้นระบบ 2 มวลที่มีความถี่เรโซแนนซ์เป็น 1.03 Hz และ $T_d = 0.05$ s โดยใช้ $T_s = 0.1$ s

โดยที่ ระบบจริงจะมีค่าฟังก์ชันโอนย้ายเป็น

$$P(z) = \frac{114.0994z^2 - 193.047z + 96.5839}{z^3 - 2.3733z^2 + 2.1886z - 0.7659}$$

$$P(s) = \frac{1250s^2 + 2083.33s + 20833.33}{s^3 + 2.667s^2 + 43.33s + 58.33}$$

ระบบที่ประมาณได้จากการจำลองจะมีค่าฟังก์ชันโอนย้ายเป็น

$$\hat{P}(z)_{sim} = \frac{-6.968z^3 + 61.94z^2 - 43.27z - 5.461}{z^3 - 2.431z^2 + 2.321z - 0.8194}$$

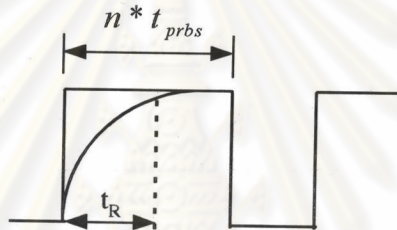
$$\hat{P}(s)_{sim} = \frac{-6.968s^3 + 161.7s^2 + 6126s + 7122}{s^3 + 1.992s^2 + 40.16s + 80.52}$$

6.2.2 เงื่อนไขในการเลือกจำนวนเซลล์ของรีจิสเตอร์เลื่อนข้อมูลของสัญญาณ PRBS

การเลือกจำนวนเซลล์ของรีจิสเตอร์เลื่อนข้อมูล (n) จะต้องคำนึงถึง t_{prbs} ที่ใช้ด้วย โดยเราพิจารณาจากความกว้างของพัลส์ของสัญญาณ PRBS ที่สูงสุดจะมีค่าเท่ากับ $n * t_{prbs}$ ซึ่งเป็นคุณลักษณะสมบัติที่สำคัญในการที่จะใช้เลือกสัญญาณ PRBS ในการหาลักษณะสมบัติของระบบ (I. Landau, 1990) โดยอย่างน้อยหนึ่งในจำนวนพัลส์ทั้งหมดควรมีค่าความกว้างของพัลส์มากกว่าช่วงเวลาขึ้น (rise time, t_R) ของระบบที่เราต้องการจะหาลักษณะสมบัติกล่าวคือ

$$n * t_{prbs} > t_R \quad (6.3)$$

เพื่อที่เราจะสามารถหาลักษณะสมบัติของระบบนั้นในช่วงของสถานะอยู่ตัวได้อย่างถูกต้อง ดังแสดงในรูปที่ 6.29



รูปที่ 6.29 การเลือกสัญญาณ PRBS โดยพิจารณาจากความกว้างพัลส์ที่สูงสุด

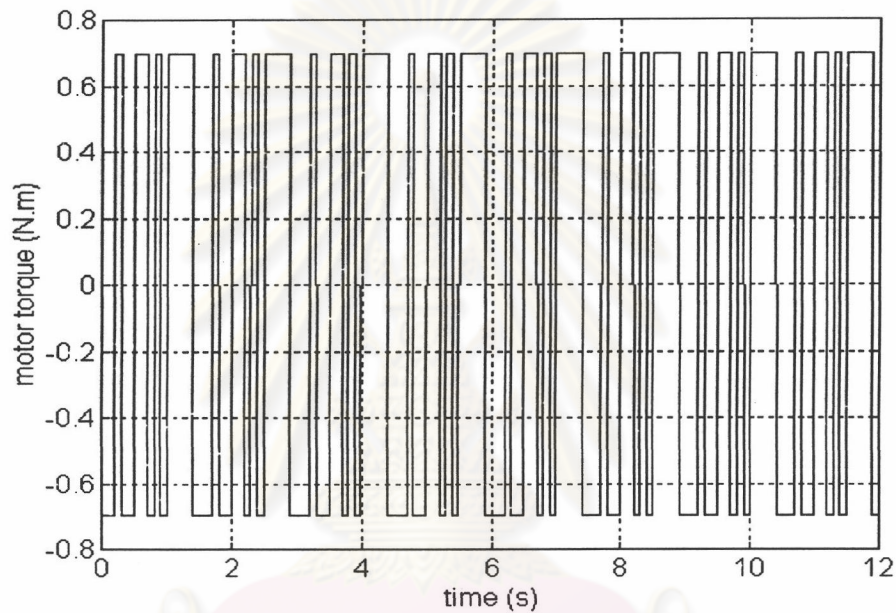
นอกจากนี้ n มีผลต่อการกระจายพลังงานของสเปกตรัมอีกด้วย ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วว่า ความถี่หลักมูลของสัญญาณ PRBS มีค่าเท่ากับ $\frac{1}{N t_{prbs}}$ เมื่อ N คือความยาวสูงสุดของลำดับของสัญญาณ PRBS ซึ่งมีค่าเท่ากับ $2^n - 1$ ดังนั้นในกรณีที่เราให้ t_{prbs} มีค่าคงที่กล่าวคือแถบความถี่ในการกระตุ้นมีค่าคงที่จะอยู่ในช่วง $0 - 1/t_{prbs}$ เท่านั้น ถ้าเราใช้ค่าของ n น้อยจำนวนความถี่ที่กระตุ้นในแถบความถี่ของสัญญาณ PRBS จะมีค่าน้อย แต่ถ้าเราใช้ค่าของ n มากขึ้นจำนวนความถี่ที่กระตุ้นในแถบความถี่ของสัญญาณ PRBS จะมีมากขึ้นซึ่งจะทำให้การหาลักษณะสมบัติมีประสิทธิภาพมากขึ้น เราจึงสามารถสรุปเงื่อนไขของการกำหนดค่า n และ t_{prbs} เป็นดังนี้

$$\frac{1}{N t_{prbs}} \ll f_{resonant} \quad (6.4)$$

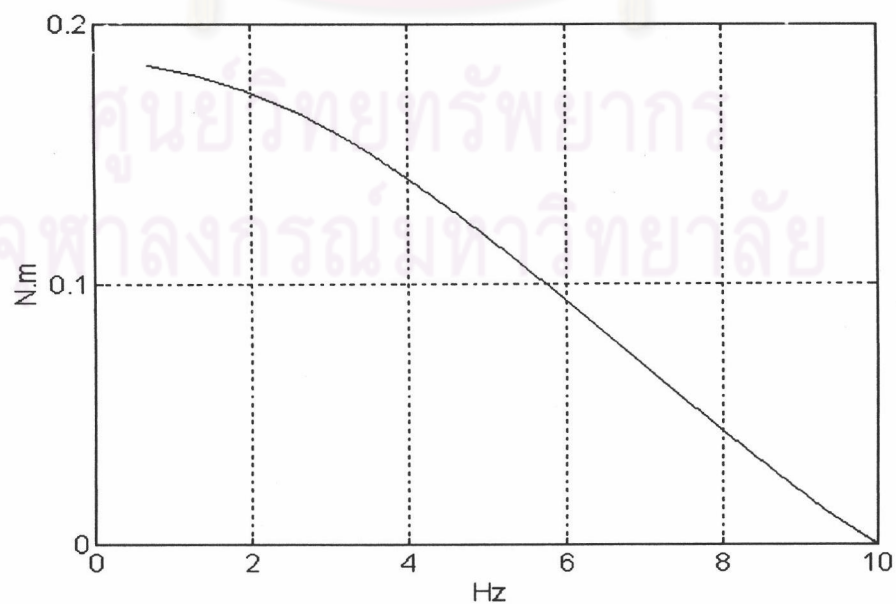
โดยเราจะทำการทดสอบแบบที่ 6.7 เพื่อสนับสนุนข้อสรุปนี้

การทดสอบแบบที่ 6.7

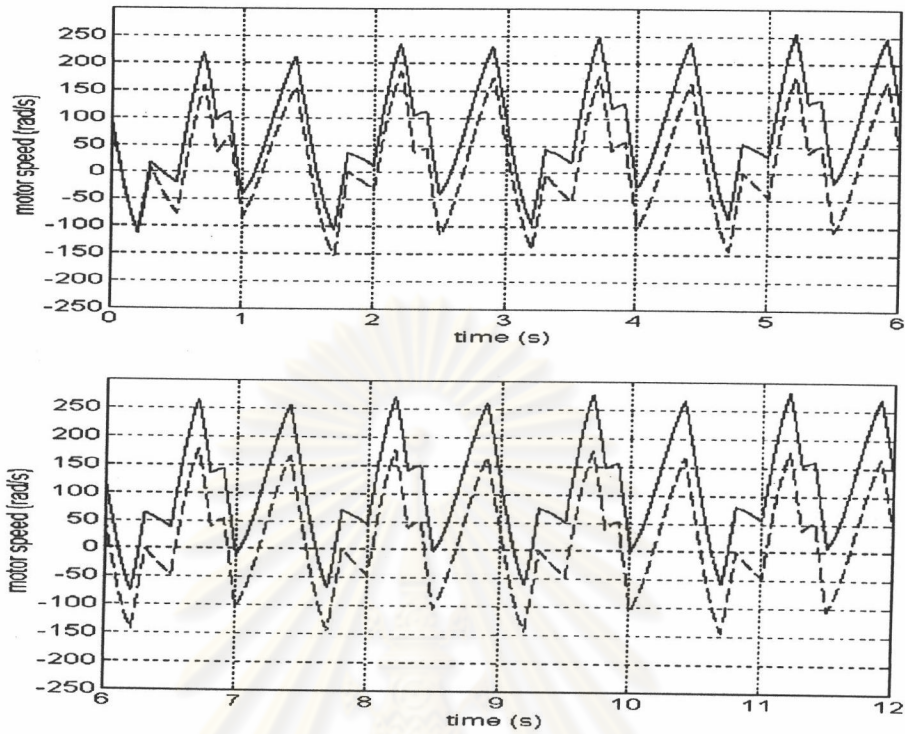
เมื่อป้อนแรงบิดของมอเตอร์เป็นสัญญาณ PRBS ที่มี $n = 4$ และ $t_{prbs} = 0.1$ s ขนาด ± 0.7 N.m เพื่อกระตุ้นระบบ 2 มวลที่มีความถี่เรโซแนนซ์เป็น 1.03 Hz โดยใช้เวลาในการสุ่มตัวอย่างเป็น 0.1 s และเก็บข้อมูลเท่ากับ 8 เท่าของคาบเวลาของสัญญาณ PRBS คือ 12 s เพื่อให้มีจำนวนข้อมูลในการประมวลผลที่มากพอ จะได้ผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 6.30 ถึง 6.34



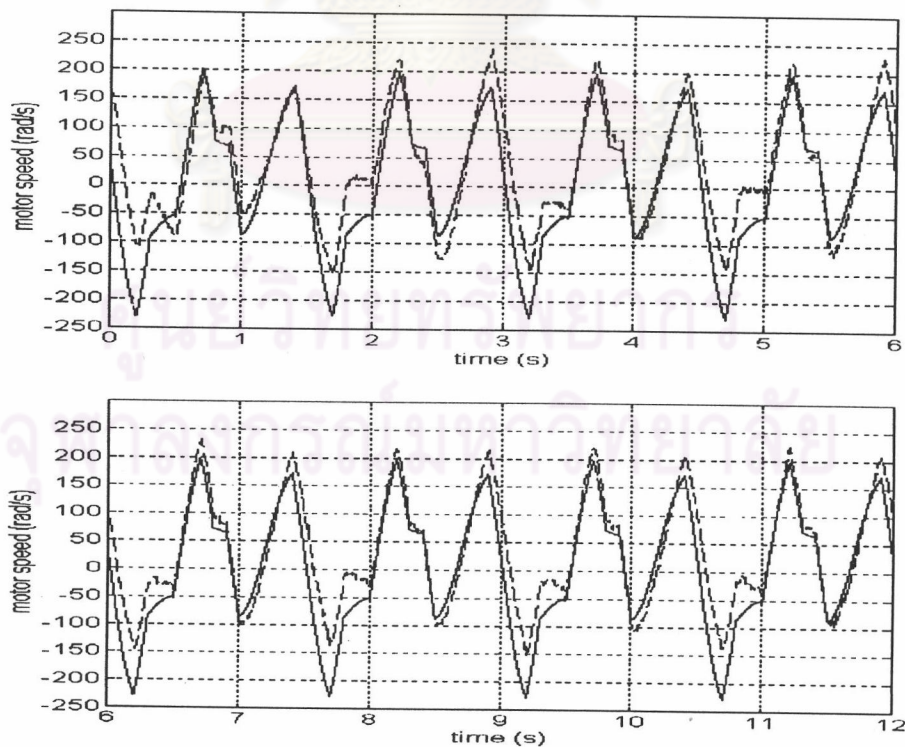
รูปที่ 6.30 แรงบิดของมอเตอร์ในการทดสอบแบบที่ 6.7



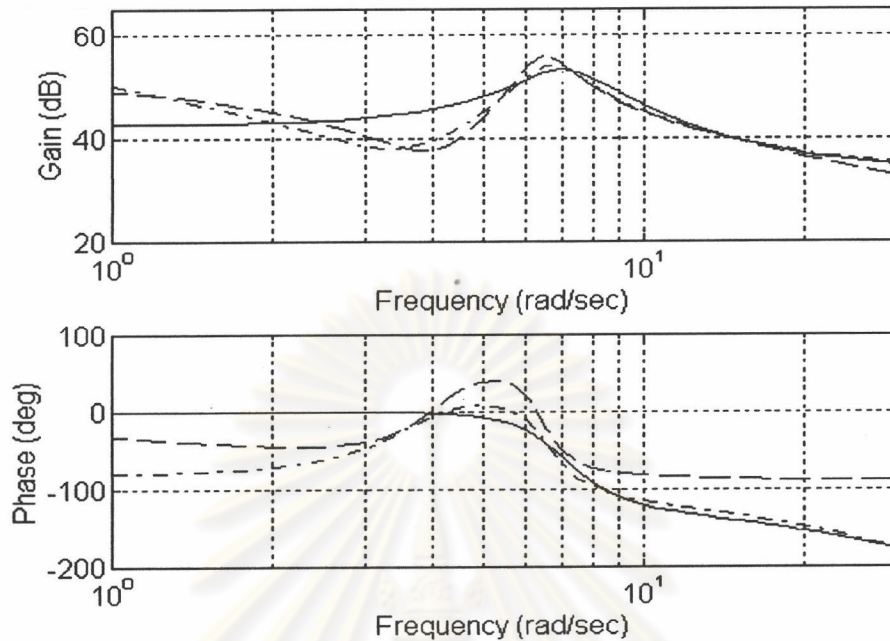
รูปที่ 6.31 สเปกตรัมของแรงบิดของมอเตอร์ในการทดสอบแบบที่ 6.7



รูปที่ 6.32 กราฟเปรียบเทียบความเร็วของมอเตอร์คำนวณจากระบบที่ประมาณได้จากการจำลอง (เส้นทึบ) และความเร็วของมอเตอร์จากการจำลอง (เส้นประ) ในการทดสอบแบบที่ 6.7



รูปที่ 6.33 กราฟเปรียบเทียบความเร็วของมอเตอร์คำนวณจากระบบที่ประมาณได้จากการทดสอบ (เส้นทึบ) และความเร็วจริงของมอเตอร์ (เส้นประ) ในการทดสอบแบบที่ 6.7



รูปที่ 6.34 กราฟเปรียบเทียบอัตราขยายและมุมเฟสของระบบที่ประมาณได้จากการทดสอบ (เส้นทึบ) ระบบที่ประมาณได้จากการจำลอง (เส้นประ-จุด) และระบบจริง (เส้นประ) ในการทดสอบแบบที่ 6.7

โดยที่ ระบบจริงจะมีค่าฟังก์ชันโอนย้ายเป็น

$$P(z) = \frac{114.0994z^2 - 193.047z + 96.5839}{z^3 - 2.3733z^2 + 2.1886z - 0.7659}$$

$$P(s) = \frac{1250s^2 + 2083.33s + 20833.33}{s^3 + 2.667s^2 + 43.33s + 58.33}$$

ระบบที่ประมาณได้จากการจำลองจะมีค่าฟังก์ชันโอนย้ายเป็น

$$\hat{P}(z)_{sim} = \frac{0.2986z^3 + 111.6z^2 - 188z + 89.11}{z^3 - 2.437z^2 + 2.269z - 0.828}$$

$$\hat{P}(s)_{sim} = \frac{0.2986s^3 + 1163s^2 + 2610s + 1.477 \times 10^4}{s^3 + 1.888s^2 + 44.26s + 4.695}$$

และระบบที่ประมาณได้จากการทดสอบจะมีค่าฟังก์ชันโอนย้ายเป็น

$$\hat{P}(z)_{exp} = \frac{-2.592z^3 + 113.1z^2 - 136.1z + 43.43}{z^3 - 2.026z^2 + 1.686z - 0.5284}$$

$$\hat{P}(s)_{\text{exp}} = \frac{-2.592s^3 + 1010s^2 + 9222s + 2.528 \times 10^4}{s^3 + 6.379s^2 + 61.1s + 186.8}$$

จากผลการทดสอบแบบที่ 6.7 ในรูปที่ 6.34 นั้นกราฟอัตราขยายและมุมเฟสของระบบที่ประมาณได้ผิดพลาดไปจากระบบจริงมากกว่าในการทดสอบแบบที่ 6.5 รูปที่ 6.22 ซึ่งใช้สัญญาณ PRBS ที่มี $n=7$ และ $t_{\text{prbs}}=0.1$ s ซึ่งการทดสอบทั้งสองต่างก็มีแถบความถี่ในการกระตุ้นเป็น 0 ถึง 10 Hz ทั้งนี้เนื่องมาจากความถี่หลักมูลของสัญญาณ PRBS ที่มี $n=4$ และ $t_{\text{prbs}}=0.1$ s มีค่าเป็น $\frac{1}{(2^4 - 1) \times 0.1} \approx 0.67$ Hz ดังนั้นจำนวนความถี่ที่กระตุ้นจึงมีน้อย แต่เมื่อเราพิจารณาเปรียบเทียบกับผลในการทดสอบแบบที่ 6.5 จะมีความถี่หลักมูลของสัญญาณ PRBS ที่มี $n=7$ และ $t_{\text{prbs}}=0.1$ s มีค่าเป็น $\frac{1}{(2^7 - 1) \times 0.1} \approx 0.079$ Hz ดังนั้นจำนวนความถี่ที่กระตุ้นจึงมีค่ามากกว่า

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

6.3 เงื่อนไขในการเลือกคาบเวลาในการสุ่มตัวอย่างข้อมูลเพื่อนำมาประมวลผล

6.3.1 คาบเวลาในการสุ่มตัวอย่างกำหนดแถบความถี่ที่เราจะพิจารณาได้

เวลาในการสุ่มตัวอย่าง (T_s) จะเป็นค่าที่กำหนดความถี่ในควิสต์ดังความสัมพันธ์ตามสมการที่ (6.5) ดังนี้คือ

$$f_{myquist} = \frac{1}{2T_s} \quad (6.5)$$

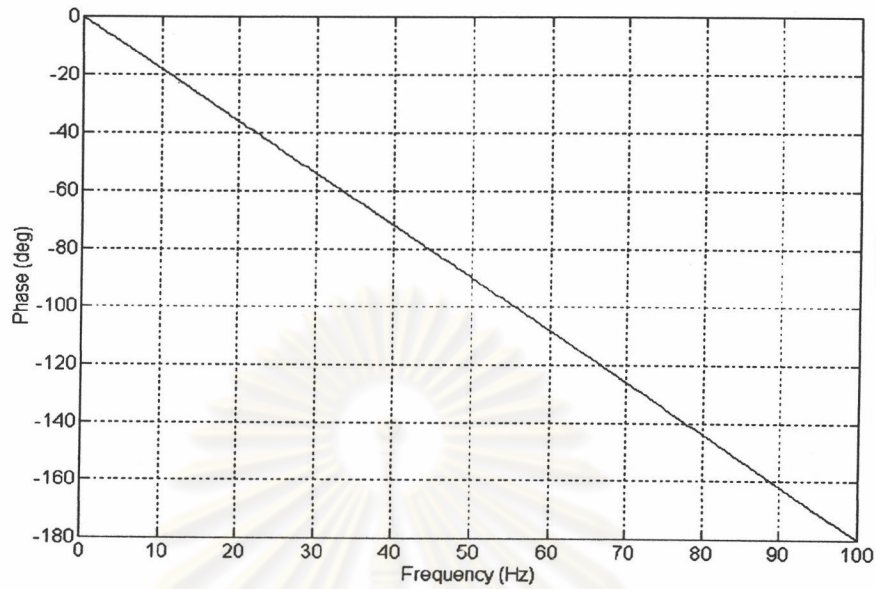
เนื่องจากข้อมูลในแถบความถี่ที่สูงกว่าความถี่ในควิสต์ก่อให้เกิดความผิดพลาดเพราะผลจากความเคลือบแฝง (aliasing) ดังนั้นความถี่ในควิสต์จึงเป็นตัวกำหนดถึงแถบความถี่ที่เราจะพิจารณาได้ โดยแถบความถี่ที่เราจะพิจารณาได้จะมีค่าอยู่ในช่วงความถี่ที่ต่ำกว่าความถี่ในควิสต์ ดังนั้นการเลือกใช้คาบเวลาในการสุ่มตัวอย่างจึงจำเป็นต้องคำนึงถึงที่เราได้แถบความถี่ที่เราจะพิจารณาได้นั้นมีค่ามากกว่าแถบความถี่หลักของระบบ 2 มวล ที่เราสนใจหรือไม่

$$f_{myquist} > f_{resonant} \quad (6.6)$$

6.3.2 ผลกระทบจากเวลาประวิง (T_d) ในมอเตอร์แบบเซอร์โว

เนื่องจากระบบในการทดสอบจริงนั้นมีเวลาประวิงอยู่ในมอเตอร์แบบเซอร์โวประมาณ 5 ms ดังกล่าวไว้ในภาคผนวก ก ซึ่งส่งผลให้ระบบมีลักษณะเป็นแบบไม่เชิงเส้นและจะก่อให้เกิดความผิดพลาดของลักษณะสมบัติของระบบ 2 มวลที่จำลองขึ้น โดยความคลาดเคลื่อนจะมีค่ามากที่ย่านความถี่สูง ซึ่งเราได้แสดงตัวอย่างของผลกระทบนี้ไว้ในรูปที่ 5.4 ถึง 5.7 ในบทที่ 5 และจากกราฟมูมเฟสลาที่ที่เกิดจากการประวิงเวลา 5 ms ในรูปที่ 6.35 เราจะเห็นได้ว่าผลกระทบของเวลาประวิงต่อเฟสของระบบจะมีสูงมากที่บริเวณความถี่สูง ดังนั้นเวลาประวิงที่มีอยู่ในระบบจึงมีผลต่อการหาลักษณะสมบัติ เพื่อที่จะแก้ปัญหาให้ผลกระทบของเวลาประวิงมีน้อยลงและลดผลของความไม่เป็นอุดมคติของระบบ 2 มวล เราจะต้องใช้เวลาในการสุ่มตัวอย่างที่มีค่ามาก ๆ กล่าวคือความถี่ในการสุ่มตัวอย่างมีค่าน้อยเพื่อให้ผลกระทบที่มาจากเวลาประวิงมีน้อยลง

$$f_{myquist} \ll \frac{1}{T_d} \quad (6.7)$$

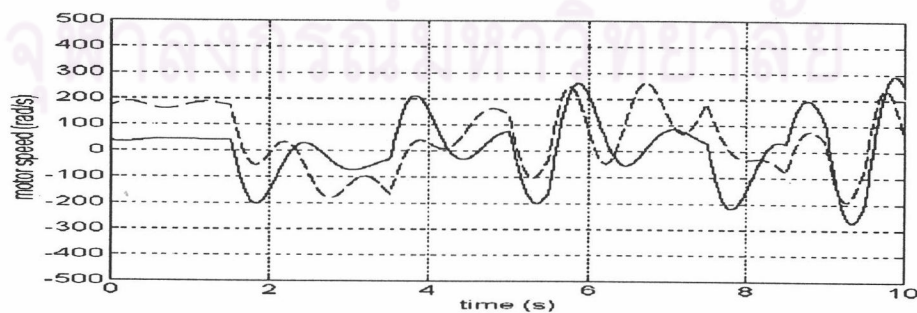


รูปที่ 6.35 กราฟมุมเฟสลำดับที่ที่เกิดจากการประวิงเวลา 5 ms

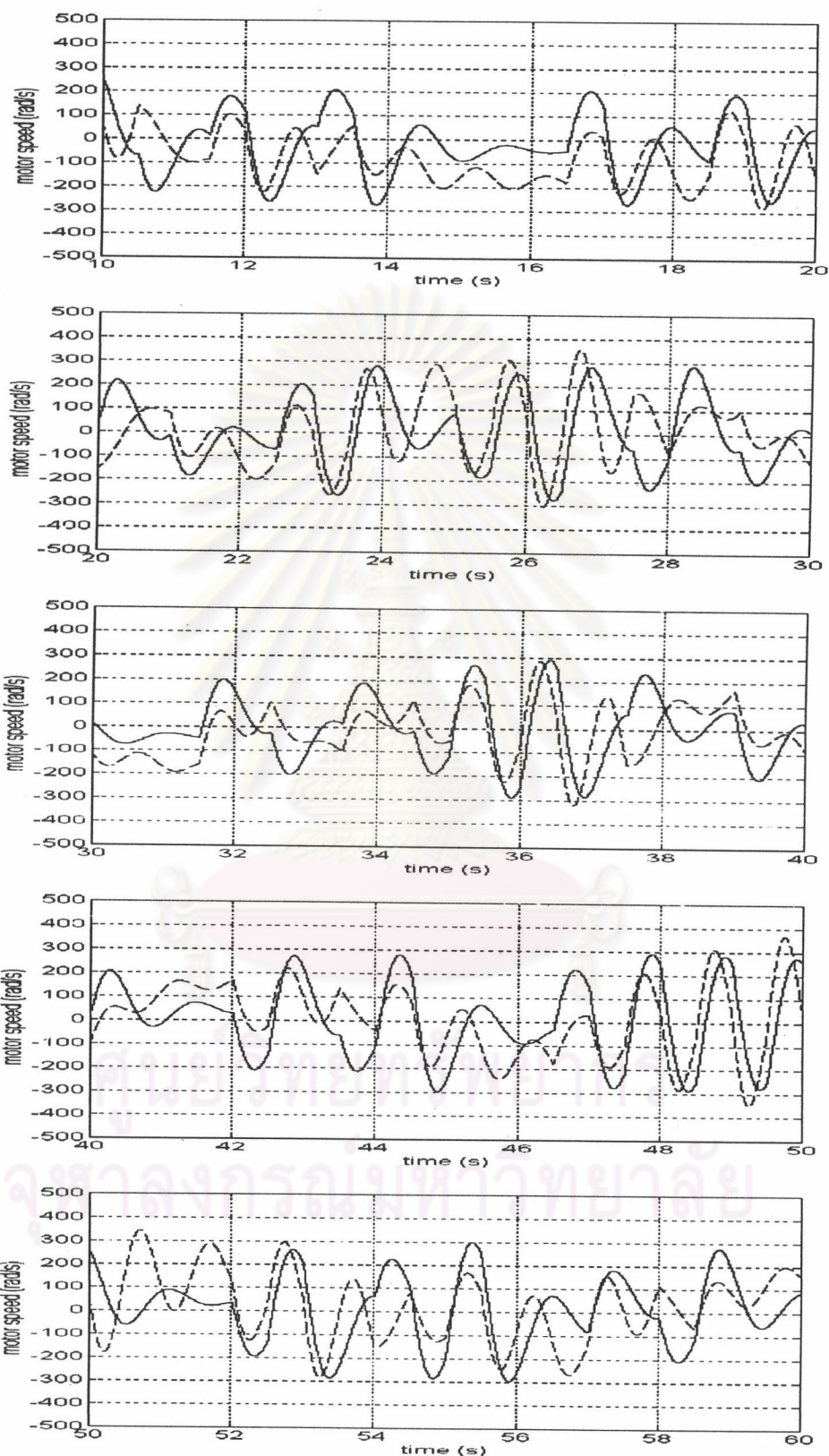
เราจะทำการทดสอบการหาลักษณะสมบัติของระบบเพื่อแสดงให้เห็นถึงผลกระทบของเวลาประวิงที่มีต่อเวลาในการสุ่มตัวอย่างดังนี้

การทดสอบแบบที่ 6.8 : เวลาในการสุ่มตัวอย่างเป็น 0.01 s

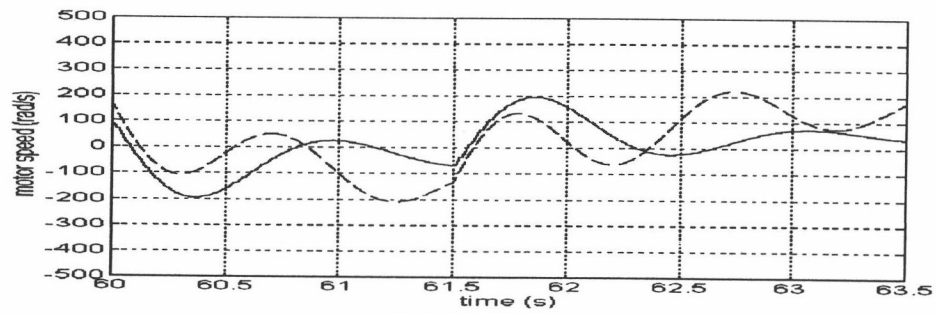
เมื่อป้อนแรงบิดของมอเตอร์เป็นสัญญาณ PRBS ที่มี $n = 7$ และ $t_{prbs} = 0.5$ s ขนาด ± 0.5 N.m เพื่อกระตุ้นระบบ 2 มวลที่มีความถี่เรโซแนนซ์เป็น 1.03 Hz เช่นเดียวกับการทดสอบแบบที่ 6.4 แต่ใช้เวลาในการสุ่มตัวอย่างสั้นลงเป็น 0.01 s และเก็บข้อมูลเท่ากับคาบเวลาของสัญญาณ PRBS คือ 63.5 s จะได้ผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 6.36 ถึง 6.38



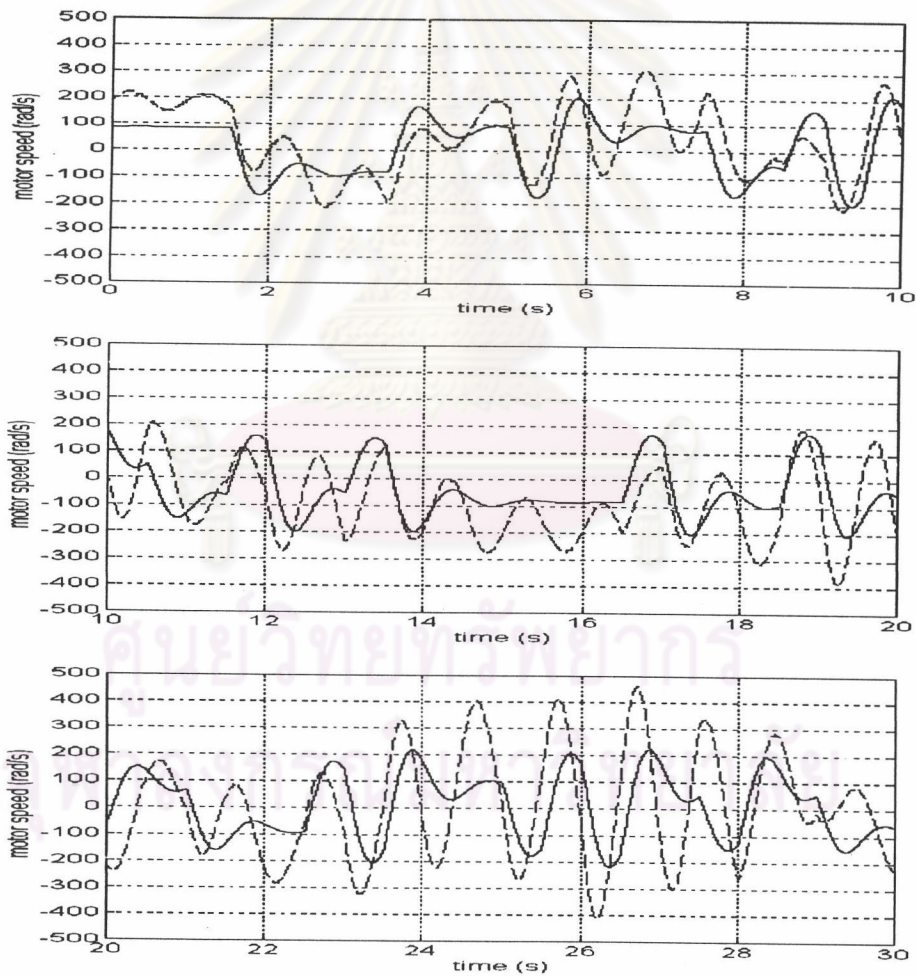
รูปที่ 6.36 กราฟเปรียบเทียบความเร็วของมอเตอร์คำนวณจากระบบที่ประมาณได้จากการจำลอง (เส้นทึบ) และความเร็วของมอเตอร์จากการจำลอง (เส้นประ) ในการทดสอบแบบที่ 6.8



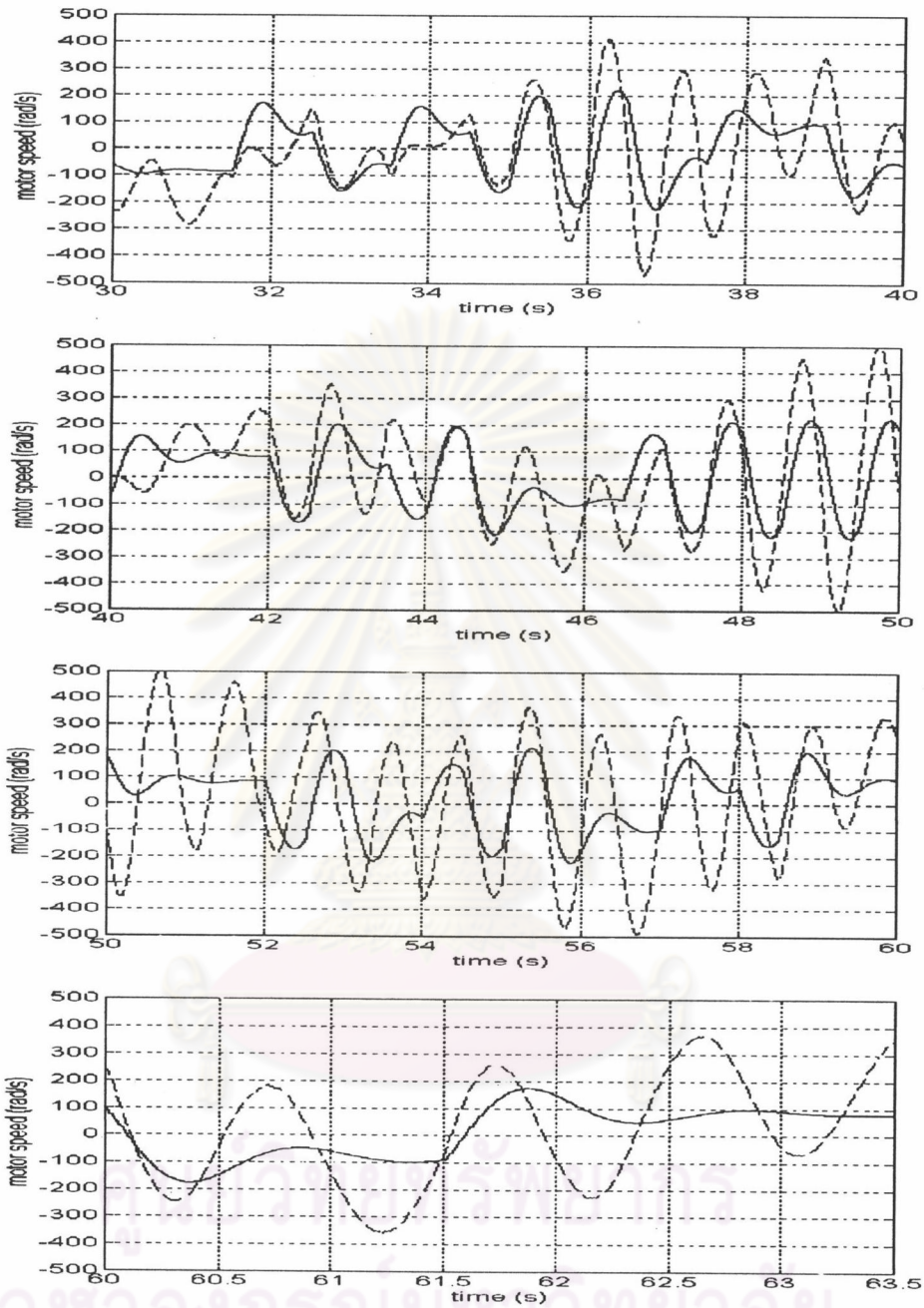
รูปที่ 6.36 (ต่อ) กราฟเปรียบเทียบความเร็วของมอเตอร์คำนวณจากระบบที่ประมาณได้จากการจำลอง (เส้นทึบ) และความเร็วของมอเตอร์จากการจำลอง (เส้นประ) ในการทดสอบแบบที่ 6.8



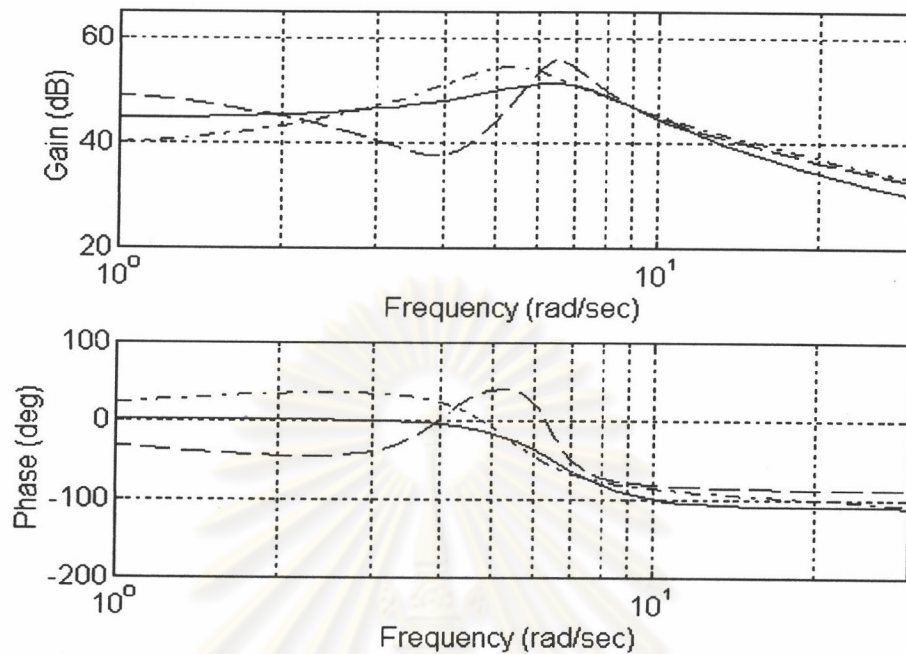
รูปที่ 6.36 (ต่อ) กราฟเปรียบเทียบความเร็วของมอเตอร์คำนวณจากระบบที่ประมาณได้จากการจำลอง (เส้นทึบ) และความเร็วของมอเตอร์จากการจำลอง (เส้นประ) ในการทดสอบแบบที่ 6.8



รูปที่ 6.37 กราฟเปรียบเทียบความเร็วของมอเตอร์คำนวณจากระบบที่ประมาณได้จากการทดสอบ (เส้นทึบ) และความเร็วจริงของมอเตอร์ (เส้นประ) ในการทดสอบแบบที่ 6.8



รูปที่ 6.37 (ต่อ) กราฟเปรียบเทียบความเร็วของมอเตอร์คำนวณจากระบบที่ประมาณได้จากการทดสอบ (เส้นทึบ) และความเร็วจริงของมอเตอร์ (เส้นประ) ในการทดสอบแบบที่ 6.8



รูปที่ 6.38 กราฟเปรียบเทียบอัตราขยายและมุมเฟสของระบบที่ประมาณได้จากการทดสอบ (เส้นทึบ) ระบบที่ประมาณได้จากการจำลอง (เส้นประ-จุด) และระบบจริง (เส้นประ) ในการทดสอบแบบที่ 6.8

โดยที่ ระบบจริงจะมีค่าฟังก์ชันโอนย้ายเป็น

$$P(z) = \frac{12.4325z^2 - 24.6390z + 12.2270}{z^3 - 2.9694z^2 + 2.9431z - 0.9737}$$

$$P(s) = \frac{1250s^2 + 2083.33s + 20833.33}{s^3 + 2.667s^2 + 43.33s + 58.33}$$

ระบบที่ประมาณได้จากการจำลองจะมีค่าฟังก์ชันโอนย้ายเป็น

$$\hat{P}(z)_{sim} = \frac{-0.07978z^3 + 7.476z^2 - 4.13z - 3.082}{z^3 - 2.204z^2 + 1.433z - 0.2271}$$

$$\hat{P}(s)_{sim} = \frac{-0.07978s^3 + 148.4s^2 + 1.997 \times 10^5 s + 3.549 \times 10^5}{s^3 + 148.3s^2 + 419.1s + 4187}$$

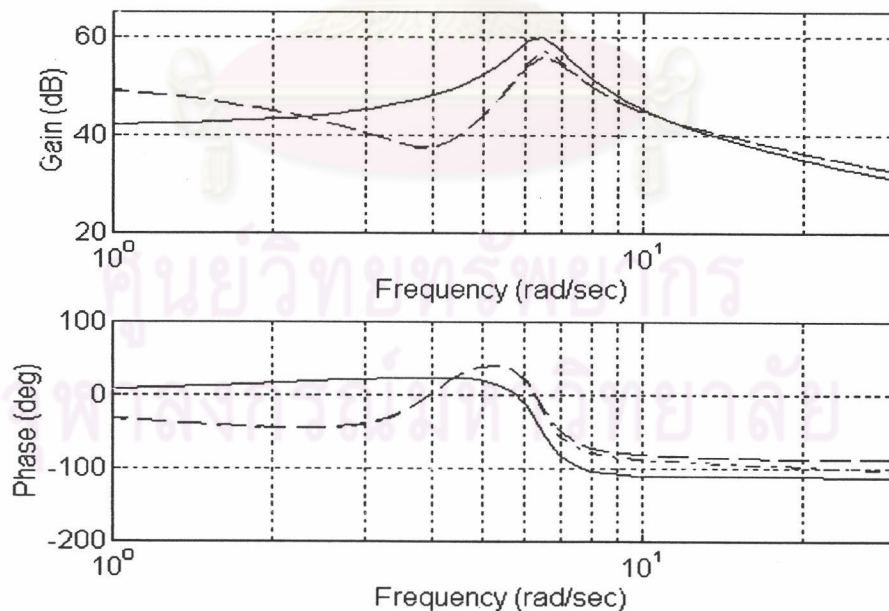
และระบบที่ประมาณได้จากการทดสอบจะมีค่าฟังก์ชันโอนย้ายเป็น

$$\hat{P}(z)_{exp} = \frac{0.3531z^3 + 5.101z^2 + 5.155z - 9.291}{z^3 - 1.17z^2 - 0.5798z + 0.7574}$$

$$\hat{P}(s)_{\text{exp}} = \frac{0.3531s^3 + 828.4s^2 + 2.807 \times 10^4 s + 1.796 \times 10^5}{s^3 + 27.79s^2 + 138.5s + 1079}$$

จากผลการทดสอบแบบที่ 6.8 ที่เราใช้เวลาในการสุ่มตัวอย่างเป็น 0.01 s ในรูปที่ 6.38 นั้น จะเห็นได้ว่าผลที่ได้นั้นผิดพลาดไปจากค่าจริงค่อนข้างมาก ทั้งนี้เนื่องมาจากความถี่ในควิสด์เป็น 50 Hz ซึ่งเวลาประวิงจะส่งผลกระทบต่อเฟสของระบบประมาณ 90 องศา ดังแสดงในรูปที่ 6.35 ทำให้การหาลักษณะสมบัติจึงมีโอกาสผิดพลาดค่อนข้างสูง และเมื่อเปรียบเทียบกับผลในการทดสอบแบบที่ 6.4 รูปที่ 6.17 ซึ่งเวลาในการสุ่มตัวอย่างเป็น 0.1 s หรือความถี่ในควิสด์เป็น 5 Hz เวลาประวิงจะส่งผลกระทบต่อเฟสของระบบประมาณ 9 องศา ดังแสดงในรูปที่ 6.35 ซึ่งน้อยกว่า เมื่อใช้เวลาในการสุ่มตัวอย่างเป็น 0.01 s มาก ทำให้ผลที่ได้ใกล้เคียงกับค่าจริงที่ควรได้มากกว่า

อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการที่เราเลือกค่าเวลาในการสุ่มตัวอย่างน้อย ผลของการประวิง เวลาจะทำให้ระบบมีอันดับสูงขึ้น ดังนั้นถ้าเราประมาณค่าของระบบโดยใช้แบบจำลองที่มีอันดับของฟังก์ชันโอนย้ายสูงขึ้น จะพบว่าได้กราฟอัตราขยายและมุมเฟสดังแสดงในรูปที่ 6.39 ซึ่งจะเห็นได้ว่าระบบที่ประมาณได้จากการจำลองมีค่าใกล้เคียงกับค่าจริงมาก แต่สำหรับระบบที่ประมาณได้จากการทดสอบถึงแม้ว่าจะมีค่าที่ผิดพลาดไปจากค่าจริงแต่ก็ให้ผลที่ดีขึ้นกว่าเดิมเช่นกัน ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากความไม่เป็นอุดมคติและค่าเวลาประวิงที่ไม่คงที่ของระบบที่ทดสอบ



รูปที่ 6.39 กราฟเปรียบเทียบอัตราขยายและมุมเฟสของระบบที่ประมาณได้จากการทดสอบ (เส้นทึบ) ระบบที่ประมาณได้จากการจำลอง (เส้นประ-จุด) และระบบจริง (เส้นประ) ในการทดสอบแบบที่ 6.8 เมื่อรวมเวลาประวิงที่มีอยู่ในระบบในการหาลักษณะสมบัติของระบบ

โดยที่ ระบบที่ประมาณได้จากการจำลองจะมีค่าฟังก์ชันโอนย้ายเป็น

$$\hat{P}(z)_{sim} = \frac{7.915 \times 10^{-11} z^8 + 7.481 z^7 + 29.26 z^6 + 14.45 z^5 - 65.23 z^4 - 46.57 z^3 + 41.16 z^2 + 23.53 z - 3.687}{z^8 + 2.259 z^7 - 3.434 z^6 - 8.338 z^5 + 7.95 z^4 + 6.378 z^3 - 6.55 z^2 + 0.7364 z - 6.629 \times 10^{-9}}$$

$$\hat{P}(s)_{sim} = \frac{7.9 \times 10^{-11} s^8 - 8022 s^7 + 2.1 \times 10^6 s^6 - 34 \times 10^8 s^5 - 15 \times 10^{10} s^4 + 3.98 \times 10^{13} s^3 - 3.99 \times 10^{14} s^2 - 1 \times 10^{14} s - 7.7 \times 10^{15}}{s^8 + 1833 s^7 + 11 \times 10^5 s^6 + 11 \times 10^8 s^5 + 3.1 \times 10^{10} s^4 - 2.9 \times 10^{11} s^3 + 3.9 \times 10^{11} s^2 - 14 \times 10^{13} s - 2.2 \times 10^{13}}$$

และระบบที่ประมาณได้จากการทดสอบจะมีค่าฟังก์ชันโอนย้ายเป็น

$$\hat{P}(z)_{exp} = \frac{-0.2116 z^8 + 4.932 z^7 + 8.114 z^6 + 0.3439 z^5 - 2.603 z^4 - 3.289 z^3 - 2.529 z^2 - 2.497 z + 0.05403}{z^8 - 0.06576 z^7 - 0.5957 z^6 - 0.01323 z^5 - 0.1254 z^4 + 0.2118 z^3 + 0.0511 z^2 + 0.1645 z - 0.01686}$$

$$\hat{P}(s)_{sim} = \frac{-0.2116 s^8 + 502.5 s^7 + 1.9 \times 10^5 s^6 + 5.1 \times 10^7 s^5 + 1.7 \times 10^{10} s^4 + 1.6 \times 10^{12} s^3 + 2.7 \times 10^{14} s^2 + 4.7 \times 10^{15} s + 1.695 \times 10^{16}}{s^8 + 408.3 s^7 + 1.2 \times 10^5 s^6 + 2.6 \times 10^7 s^5 + 2.7 \times 10^9 s^4 + 2.9 \times 10^{11} s^3 + 3.8 \times 10^{12} s^2 + 1.6 \times 10^{13} s + 1.4 \times 10^{14}}$$

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าผลกระทบที่มาจากเวลาประวิงจะมีน้อยลงเมื่อเราใช้เวลาในการสุ่มตัวอย่างที่มีค่ามากกว่าเวลาประวิงของระบบมาก ๆ ทำให้ผลของการหาลักษณะสมบัติของระบบใกล้เคียงค่าจริงได้มากขึ้น แต่ทั้งนี้เราจะต้องคำนึงถึงว่าเวลาในการสุ่มตัวอย่างที่ใช้ทำให้แถบความถี่ที่เราจะพิจารณาได้นั้นมีค่ามากกว่าแถบความถี่ของระบบที่เราสนใจด้วยหรือไม่

วิธีการเลือกสัญญาณด้านเข้าและเงื่อนไขที่เหมาะสมในการหาลักษณะสมบัติของระบบสามารถกล่าวสรุปได้ดังนี้คือ

สัญญาณด้านเข้าควรเป็นสัญญาณ PRBS ที่มีคุณสมบัติดังนี้

- $T_d \ll t_{prbs} \lesssim \frac{1}{f_{resonant}}$
- $n * t_{prbs} > t_R$
- $\frac{1}{N t_{prbs}} \ll f_{resonant}$

และควรเลือกคาบเวลาในการสุ่มตัวอย่างข้อมูลเพื่อนำมาประมวลผลตามเงื่อนไขดังนี้

- $f_{resonant} < f_{nyquist} = \frac{1}{2T_s} \ll \frac{1}{T_d}$