บทที่ 7

การวิเคราะห์ผลของการกำหนดอัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุดที่มีต่อการออกแบบวงจรที่ไม่ไวต่อความหน่วงชนิดปรับมาตราส่วนได้

ในบทนี้เสนอการวิเคราะห์ผลของการกำหนดอัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุดที่มีต่อการออกแบบวงจรเชิงผสมแบบอสมวารที่ไม่ไวต่อความหน่วงชนิดปรับมาตราส่วนได้เปรียบเทียบกับวงจรที่ไม่ไวต่อความหน่วงชนิดเสมือนที่ออกแบบในภาวะแวดล้อมมูลฐานและที่ออกแบบในภาวะแวดล้อมรับเข้าส่งออก

เนื่องจากในกลุ่มแบบจำลองความหน่วงชนิดไม่มีขอบเขตซึ่งประกอบด้วยแบบจำลองความหน่วงแบบไม่ไวต่อความหน่วง แบบจำลองความหน่วงแบบไม่ไวต่อความหน่วงชนิดเสมือน และแบบจำลองความหน่วงแบบไม่ไวต่อความหน่วงชนิดปรับมาตราส่วนได้ การออกแบบวงจรระดับเลย์เอาท์จะไม่กำหนดค่าความหน่วงเกตและความหน่วงสายแต่ทราบว่ามีค่าอยู่ในขอบเขตหนึ่งที่ไม่ใช่อนันต์ ทำให้การออกแบบวงจรระดับเกตไม่สามารถทราบค่าความหน่วงจริงของการเปลี่ยนระดับสัญญาณในวงจรและไม่สามารถใช้สายหนึ่งเส้นต่อการส่งข้อมูลขนาดหนึ่งบิตได้ การออกแบบวงจรเชิงผสมจึงต้องใช้รหัสรางคู่ในการออกแบบและให้วงจรสามารถทำงานตามฟังก์ชันตรรกะสามค่า ซึ่งส่งผลให้การออกแบบส่วนวงจรรางคู่มีสองแนวทาง คือ การออกแบบโดยใช้ตรรกะรางคู่ที่ไร้ตัวผกผันและการออกแบบโดยใช้แผนภาพตัดสินใจแบบทวิภาคชนิดมีการลดทอนอันดับ โดยการออกแบบทั้งสองแบบไม่ขึ้นกับการกำหนดแบบจำลองความหน่วงและแบบจำลองการทำงานสิ่งแวดล้อม และเมื่อพิจารณาเฉพาะแบบจำลองความหน่วงแบบไม่ไวต่อความหน่วงชนิดปรับมาตราส่วนได้ พบว่า การออกแบบส่วนวงจรรางคู่ทั้งสองแบบข้างต้นไม่ขึ้นกับการกำหนดอัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุด

จากการวิเคราะห์การออกแบบวงจรเชิงผสมข้างต้น สรุปได้ว่า ในวงจรเชิงผสมจะมีส่วนวงจรตอบรับเท่านั้นที่การออกแบบขึ้นกับการกำหนดแบบจำลองความหน่วงในกลุ่มแบบจำลองความหน่วงชนิดไม่มีขอบเขต และแบบจำลองการทำงานสิ่งแวดล้อม ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองความหน่วงแบบไม่ไวต่อความหน่วงชนิดปรับมาตราส่วนได้จะได้ว่า การวิเคราะห์ความแปรปรวนความหน่วงส่งผลต่อการออกแบบส่วนวงจรตอบรับเท่านั้น

เมื่อพิจารณาการออกแบบส่วนวงจรตอบรับในบทที่ 3 จะได้ว่า ในการออกแบบโดยใช้บัฟเฟอร์การกำหนดอัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุดมีผลต่อการคำนวณค่าความหน่วงของบัฟเฟอร์ในการประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณ กล่าวคือ เมื่อกำหนดอัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุดค่าสูงขึ้นการออกแบบจะต้องใช้ค่าความหน่วงของบัฟเฟอร์สูงขึ้น แต่เมื่อพิจารณาการออกแบบโดยใช้เกตออร์ร่วมกับสรุปภาพรวมที่ได้จากผลการทดลองในบทที่ 6 จะได้ว่า การกำหนดอัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุดมีผลต่อการเลือกสายและการคำนวณค่าความหน่วงของเกตในส่วนวงจรตอบรับ ดังนั้นการพิจารณาวงจรเชิงผสมแบบอสมวารที่ไม่ไวต่อความหน่วงชนิดปรับมาตราส่วนได้ในบทนี้จึงพิจารณาเฉพาะกรณีส่วนวงจรตอบรับออกแบบโดยใช้เกตออร์เท่านั้น

ในบทนี้เสนอการวิเคราะห์ผลของการกำหนดอัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุดที่มีต่อการออกแบบวงจรตามลำดับดังนี้ การวิเคราะห์ผลของอัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุดที่มีต่อการเลือกสาย และการวิเคราะห์ผลของอัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุดที่มีต่อค่าความหน่วงของเกตในส่วนวงจรตอบรับ

7.1 การวิเคราะห์ผลของอัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุดที่มีต่อการเลือกสาย

จากแบบจำลองความหน่วงที่ใช้ในการออกแบบ สามารถแบ่งพิจารณาลักษณะของส่วนวงจรตอบรับได้ดังนี้

1. สำหรับแบบจำลองความหน่วงแบบไม่ไวต่อความหน่วงชนิดปรับมาตราส่วนได้

จากวิธีการเลือกสายเมื่อพิจารณาความแปรปรวนความหน่วงในหัวข้อ 3.3.2.2 จะได้ว่า เมื่อกำหนดอัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุดในการออกแบบวงจรให้สูงขึ้น ส่วนวงจรตอบรับจะมีการเลือกสายจากส่วนวงจรรางคู่มากขึ้นเพื่อให้สามารถประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณที่มีความคลาดเคลื่อนในการประมาณค่าความหน่วงได้ดีขึ้น

2. สำหรับแบบจำลองความหน่วงแบบไม่ไวต่อความหน่วงชนิดเสมือน

จากการทดลองวัดอัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุดของวงจรที่ไม่ไวต่อความหน่วงชนิดเสมือนในหัวข้อ 6.2 พบว่า ในภาวะแวดล้อมมูลฐานที่มีอัตราส่วนความแปร

ปรวนความหน่วงสูงสุดค่าน้อยกว่าหนึ่ง ส่วนวงจรตอบรับจะเลือกเฉพาะสายอินพุตของส่วนวงจรรางคู่เท่านั้น แต่ในภาวะแวดล้อมรับเข้าส่งออก ส่วนวงจรตอบรับจะเลือกสายทุกเส้นในส่วนวงจรรางคู่และมีอัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุดค่ามากกว่าหนึ่ง

เมื่อพิจารณาลักษณะการเลือกสายเปรียบเทียบระหว่างการออกแบบบนแบบจำลองความหน่วงแบบไม่ไวต่อความหน่วงชนิดปรับมาตราส่วนได้กับการออกแบบบนแบบจำลองความหน่วงแบบไม่ไวต่อความหน่วงชนิดเสมือน พบว่ามีลักษณะตรงกันคือ เมื่ออัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุดมีค่าสูงขึ้นส่วนวงจรตอบรับจะเลือกสายจากส่วนวงจรรางคู่มากขึ้น จึงได้ว่า ในแบบจำลองความหน่วงแบบไม่ไวต่อความหน่วงชนิดปรับมาตราส่วนได้การกำหนดอัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุดในการออกแบบวงจรมีผลเทียบได้กับการเลือกแบบจำลองการทำงานสิ่งแวดล้อมในการออกแบบวงจรที่ไม่ไวต่อความหน่วงชนิดเสมือน

นอกจากนี้ ในแบบจำลองความหน่วงแบบไม่ไวต่อความหน่วงชนิดปรับมาตราส่วนได้จะไม่มีการแบ่งลักษณะการออกแบบตามแบบจำลองการทำงานสิ่งแวดล้อม เนื่องจากการออกแบบจะมุ่งพิจารณาให้วงจรสามารถทนต่ออัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุดที่กำหนด แต่ทั้งนี้ เนื่องจากวงจรที่ได้สามารถประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณภายในวงจรได้เอง ดังนั้นวงจรจึงสามารถทำงานเทียบได้กับการออกแบบโดยใช้ภาวะแวดล้อมรับเข้าส่งออก

7.2 การวิเคราะห์ผลของอัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุดที่มีต่อค่าความหน่วงของเกตในส่วนวงจรตอบรับ

จากแบบจำลองความหน่วงที่ใช้ในการออกแบบ สามารถแบ่งพิจารณาลักษณะของส่วนวงจรตอบรับได้ดังนี้

1. สำหรับแบบจำลองความหน่วงแบบไม่ไวต่อความหน่วงชนิดปรับมาตราส่วนได้

จากสมการคำนวณค่าความหน่วงของส่วนวงจรตอบรับในหัวข้อ 3.3.3 พบว่า เมื่อกำหนดอัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุดในการออกแบบวงจรให้สูงขึ้น ส่วนวงจรตอบรับจะต้องมีค่าความหน่วงประมาณสูงขึ้นเป็นสัดส่วนตรงกับอัตราส่วนความแปรปรวน

ความหน่วงสูงสุดเพื่อประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณและให้วงจรเชิงผสมที่ได้สามารถทำงานถูกต้อง

2. สำหรับแบบจำลองความหน่วงแบบไม่ไวต่อความหน่วงชนิดเสมือน

จากสมการคำนวณอัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุดในหัวข้อ 4.2 และจากสรุปผลการทดลองที่ 6.2 จะได้ว่า การออกแบบสามารถเพิ่มความทนต่อความแปรปรวนความหน่วงของวงจรให้มีอัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุดค่าสูงขึ้นได้โดย การเพิ่มค่าความหน่วงของเกตในส่วนวงจรตอบรับเพื่อให้ค่าความหน่วงการเปลี่ยนระดับสัญญาณที่สัญญาณแสดงความบริบูรณ์สูงขึ้นเมื่อเทียบสัดส่วนกับค่าความหน่วงของส่วนวงจรรางคู่

เมื่อพิจารณาผลของอัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุดที่มีต่อค่าความหน่วงของส่วนวงจรตอบรับ จะได้ว่า ทั้งการออกแบบวงจรบนแบบจำลองความหน่วงแบบไม่ไวต่อความหน่วงชนิดปรับมาตราส่วนได้และการออกแบบบนแบบจำลองความหน่วงแบบไม่ไวต่อความหน่วงชนิดเสมือน การเพิ่มอัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุดส่งผลต่อการเพิ่มค่าความหน่วงของเกตในส่วนวงจรตอบรับเพื่อให้สามารถประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณในส่วนวงจรรางคู่ให้ได้วงจรเชิงผสมที่มีความสามารถทนต่อความแปรปรวนความหน่วงได้สูงขึ้น

ดังนั้น เมื่อพิจารณารวมผลของอัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุดทั้งที่มีต่อการเลือกสายและที่มีต่อค่าความหน่วงของเกตในส่วนวงจรตอบรับ สรุปได้ว่า การกำหนดอัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุดในการออกแบบวงจรที่ไม่ไวต่อความหน่วงชนิดปรับมาตราส่วนได้มีผลเทียบได้กับการเลือกแบบจำลองความหน่วงและแบบจำลองการทำงานสิ่งแวดล้อมในการออกแบบวงจร ดังแสดงในรูปที่ 7.1

K	K < 1	K > 1	K >> 1	K = α
	FM+QDI	IO+QDI	IO+QDI	DI
	เลือกสายเฉพาะที่อินพุตทำให้วงจรสามารถทนต่อความแปรปรวนความหน่วงที่อินพุตได้เทียบเท่าอนันต์ แต่วงจรยังคงไม่สามารถทนต่อความแปรปรวนความหน่วงที่เกต สายและกิ่งของสายภายในวงจรได้ และต้องใช้ค่าความหน่วงการทำงานของสิ่งแวดล้อมในการประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณ	เลือกสายทุกเส้น ทำให้วงจรสามารถทนต่อความแปรปรวนความหน่วงที่ทุกเกตและสายได้เทียบเท่าอนันต์ แต่วงจรยังคงไม่สามารถทนต่อความแปรปรวนความหน่วงที่กิ่งของสายภายในวงจรได้	เพิ่มค่าความหน่วงที่เกตในส่วนวงจรตอบรับ เพื่อให้วงจรที่ได้สามารถทนต่อความแปรปรวนความหน่วงที่กิ่งของสายภายในวงจร และได้วงจรที่สามารถทนต่อความแปรปรวนความหน่วงที่อัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุดค่าสูงขึ้น	วงจรสามารถทนต่อความแปรปรวนความหน่วงที่ทุกเกต สายและกิ่งของสายในวงจรเทียบเท่าอัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุดเป็นค่าอนันต์
บน SDI	เลือกสายเท่าที่จำเป็นและใช้ค่าความหน่วงของเกตออร์ในส่วนวงจรตอบรับร่วมกัน เพื่อให้วงจรสามารถทนต่อความแปรปรวนความหน่วงที่อัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุดที่กำหนด โดยถือว่าอัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุดที่เกต สาย และกิ่งของสายมีค่าเท่ากัน		เลือกสายทุกเส้นและใช้ค่าความหน่วงของเกตออร์ในส่วนวงจรตอบรับร่วมกัน เพื่อให้วงจรสามารถทนต่อความแปรปรวนความหน่วงที่อัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุดได้ที่ค่าสูงขึ้น โดยถือว่าอัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุดที่เกต สาย และกิ่งของสายมีค่าเท่ากัน	

รูปที่ 7.1 การกำหนดอัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุด(K) กับการเลือกแบบจำลองความหน่วงและแบบจำลองการทำงานสิ่งแวดล้อมในการออกแบบวงจร

จากรูปสรุปได้ว่า ในแบบจำลองความหน่วงแบบไม่ไวต่อความหน่วงชนิดปรับมาตราส่วนได้ การเพิ่มอัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุดมีผลต่อการออกแบบวงจรเทียบได้กับการเลือกแบบจำลองความหน่วงและแบบจำลองการทำงานสิ่งแวดล้อม แต่ทั้งนี้ แม้ว่าการออกแบบวงจรที่ไม่ไวต่อความหน่วงชนิดปรับมาตราส่วนได้จะสามารถเพิ่มอัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุดให้มีค่าสูงขึ้นเทียบเท่าอัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุดของวงจรที่ไม่ไวต่อความหน่วงชนิดเสมือน แต่วงจรที่ได้ก็ไม่สามารถมีอัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุดที่เกตและสายเป็นอนันต์ได้เช่นเดียวกับวงจรที่ไม่ไวต่อความหน่วงชนิด

เสมือน เนื่องจากส่วนวงจรตอบรับที่ไม่ไวต่อความหน่วงชนิดเสมือนมีการใช้อุปกรณ์ชนิดซีซึ่งสามารถสร้างเอาต์พุตที่ใช้ประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณได้ทั้งในขั้นทำงานและในขั้นว่าง จึงประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณได้ดีกว่าการใช้เกตออร์ในส่วนวงจรตอบรับที่ไม่ไวต่อความหน่วงชนิดปรับมาตราส่วนได้ ซึ่งเอาต์พุตของเกตออร์สามารถใช้ในการประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณได้เฉพาะในขั้นว่างและต้องใช้ค่าความหน่วงของเกตช่วยในการประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณในขั้นทำงาน

เมื่อพิจารณาลักษณะการส่งผ่านระดับสัญญาณที่เกิดขึ้นจริงบนเลย์เอาท์เปรียบเทียบกับการประมาณค่าความหน่วงในการออกแบบวงจรระดับเกตพบว่า ความคลาดเคลื่อนในการประมาณหรือความแปรปรวนความหน่วงจะมีค่าอยู่ในขอบเขตหนึ่งที่ไม่ใช่อนันต์ ดังนั้นการออกแบบวงจรที่ไม่ไวต่อความหน่วงชนิดปรับมาตราส่วนได้ซึ่งใช้การวิเคราะห์ผลของความคลาดเคลื่อนในการประมาณเพื่อกำหนดอัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุดและออกแบบวงจรระดับเกตให้มีค่าความหน่วงการเปลี่ยนระดับสัญญาณถูกต้องทนต่อความแปรปรวนความหน่วงที่อัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุดดังกล่าว การออกแบบจะให้วงจรที่สามารถทำงานถูกต้องและใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติ

สรุป

ในบทนี้เสนอการวิเคราะห์ผลของการกำหนดอัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุดที่มีต่อการออกแบบวงจรที่ไม่ไวต่อความหน่วงชนิดปรับมาตราส่วนได้ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับวงจรที่ไม่ไวต่อความหน่วงชนิดเสมือน พบว่า การกำหนดอัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุดในการออกแบบมีผลเทียบได้กับการเลือกแบบจำลองการทำงานสิ่งแวดล้อมและแบบจำลองความหน่วงแบบในกลุ่มแบบจำลองความหน่วงชนิดไม่มีขอบเขต กล่าวคือ ที่อัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุดมีค่าต่ำ ส่วนวงจรตอบรับจะเลือกสายจากส่วนวงจรรางคู่น้อยและมีค่าความหน่วงของเกตน้อยซึ่งเทียบได้กับภาวะแวดล้อมมูลฐานที่เลือกเฉพาะสายอินพุต และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุดให้มีค่าสูงขึ้น ส่วนวงจรตอบรับจะเลือกสายจากส่วนวงจรรางคู่มากขึ้นและมีค่าความหน่วงของเกตมากขึ้นซึ่งเทียบได้กับการเปลี่ยนภาวะแวดล้อมมูลฐานเป็นภาวะแวดล้อมรับเข้าส่งออกและมีความสามารถในการทนต่อความแปรปรวนความหน่วงเข้าใกล้การไม่ไวต่อความหน่วง

แต่ทั้งนี้วงจรที่ไม่ไวต่อความหน่วงชนิดปรับมาตราส่วนได้ที่ได้ก็ไม่สามารถทนต่อความแปรปรวนความหน่วงที่อัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุดที่เกตและสายเป็นอนันต์เช่นเดียวกับวงจรที่ไม่ไวต่อความหน่วงชนิดเสมือนได้ เนื่องจากในแบบจำลองความหน่วงแบบไม่ไวต่อความหน่วงชนิดเสมือน ส่วนวงจรตอบรับจะมีการใช้อุปกรณ์ชนิดซีซึ่งสามารถประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณได้ทั้งในขั้นทำงานและในขั้นว่างได้ดีกว่าการใช้เกตออร์ในการออกแบบวงจรที่ไม่ไวต่อความหน่วงชนิดปรับมาตราส่วนได้

เมื่อพิจารณาลักษณะการส่งผ่านระดับสัญญาณบนเลย์เอาท์เปรียบเทียบกับการประมาณค่าความหน่วงพบว่า ความแปรปรวนความหน่วงที่เกิดขึ้นจริงไม่เป็นอนันต์ ทำให้การออกแบบวงจรที่ไม่ไวต่อความหน่วงชนิดปรับมาตราส่วนได้ซึ่งมีการวิเคราะห์ลำดับการเปลี่ยนระดับสัญญาณในวงจรที่ออกแบบให้ถูกต้องในขอบเขตอัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุดที่กำหนด จึงได้วงจรที่ทำงานได้ถูกต้องและสามารถนำมาใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติ