บทที่ 3

การออกแบบวงจรเชิงผสมแบบอสมวารที่ไม่ไวต่อความหน่วงชนิดปรับมาตราส่วนได้

ในการออกแบบวงจรเชิงผสมแบบอสมวารให้มีคุณสมบัติไม่เกิดฮาซาร์ดจะทำการแบ่งวงจรเป็นสองส่วน คือ ส่วนวงจรรางคู่ทำหน้าที่คำนวณเอาต์พุตตามฟังก์ชันตรรกะที่ต้องการ และส่วนวงจรตอบรับทำหน้าที่ตรวจสอบการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณในส่วนวงจรรางคู่ ซึ่งหมายถึงสัญญาณแสดงความบริบูรณ์ของส่วนวงจรตอบรับจะต้องมีการเปลี่ยนระดับสัญญาณภายหลังการสิ้นสุดทุกการเปลี่ยนระดับสัญญาณในส่วนวงจรรางคู่

เมื่อพิจารณาแนวทางการออกแบบวงจรที่ไม่ไวต่อความหน่วงชนิดปรับมาตราส่วนได้ในหัวข้อ 2.5 จะได้ว่าสามารถแทนส่วนวงจรรางคู่และส่วนวงจรตอบรับด้วยเส้นทางส่งผ่านสัญญาณ t1 และ t2 ตามลำดับ ซึ่งส่วนวงจรรางคู่มีการออกแบบได้สองแนวทาง คือ การออกแบบโดยใช้ตรรกะรางคู่ที่ไร้ตัวผกผันและการออกแบบโดยใช้แผนภาพตัดสินใจแบบทวิภาคชนิดมีการลดทอนอันดับ ส่วนวงจรตอบรับออกแบบโดยใช้การวิเคราะห์ลักษณะการส่งผ่านระดับสัญญาณในส่วนวงจรรางคู่เพื่อประมาณค่าความหน่วงการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณของส่วนวงจรรางคู่ และออกแบบให้สัญญาณแสดงความบริบูรณ์มีค่าความหน่วงการเปลี่ยนระดับสัญญาณเป็น K เท่าเพื่อให้วงจรเชิงผสมที่ได้มีความทนต่อความแปรปรวนความหน่วงที่อัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุด(K) ซึ่งจากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนระดับสัญญาณในการทำงานรางคู่แบบสองขั้นชนิดกลับสู่ศูนย์ สรุปได้ว่า การออกแบบส่วนวงจรตอบรับที่ไร้อุปกรณ์ชนิดซีมีสองแนวทาง คือ การออกแบบส่วนวงจรตอบรับโดยใช้เกตออร์และการออกแบบส่วนวงจรตอบรับโดยใช้บัฟเฟอร์

ในบทนี้เสนอแนวทางการออกแบบวงจรเชิงผสมแบบอสมวารที่ไม่ไวต่อความหน่วงชนิดปรับมาตราส่วนได้ ตามลำดับดังนี้ การออกแบบส่วนวงจรรางคู่ การวิเคราะห์ลักษณะการส่งผ่านระดับสัญญาณในส่วนวงจรรางคู่ การออกแบบส่วนวงจรตอบรับโดยใช้เกตออร์ และการออกแบบส่วนวงจรตอบรับโดยใช้บัฟเฟอร์

3.1 การออกแบบส่วนวงจรรางคู่

จากแนวทางการออกแบบวงจรเชิงผสมแบบอสมวารในหัวข้อ 2.6 จะได้ว่า ในกลุ่มแบบจำลองความหน่วงชนิดไม่มีขอบเขตซึ่งประกอบด้วย แบบจำลองความหน่วงแบบไม่ไวต่อความหน่วง แบบจำลองความหน่วงแบบไม่ไวต่อความหน่วงชนิดเสมือน และแบบจำลองความหน่วงแบบไม่ไวต่อความหน่วงชนิดปรับมาตราส่วนได้ การออกแบบวงจรจะต้องใช้การเข้ารหัสข้อมูลโดยใช้รหัสรางคู่ ซึ่งส่งผลให้ส่วนวงจรรางคู่ที่เป็นส่วนของฟังก์ชันตรรกะมีการออกแบบเหมือนกัน แต่ส่วนวงจรตอบรับที่เป็นส่วนตรวจสอบการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณจะมีการออกแบบต่างกันขึ้นกับแนวทางการวิเคราะห์ลักษณะการส่งผ่านระดับสัญญาณตามข้อกำหนดความหน่วงในแต่ละแบบจำลองความหน่วง

ดังนั้น แนวทางการออกแบบส่วนวงจรรางคู่ที่ไม่ไวต่อความหน่วงชนิดปรับมาตราส่วนได้จึงมีสองแนวทาง คือ การออกแบบโดยใช้ตรรกะรางคู่ที่ไร้ตัวผกผันและการออกแบบโดยใช้แผนภาพตัดสินใจแบบทวิภาคชนิดมีการลดทอนอันดับ

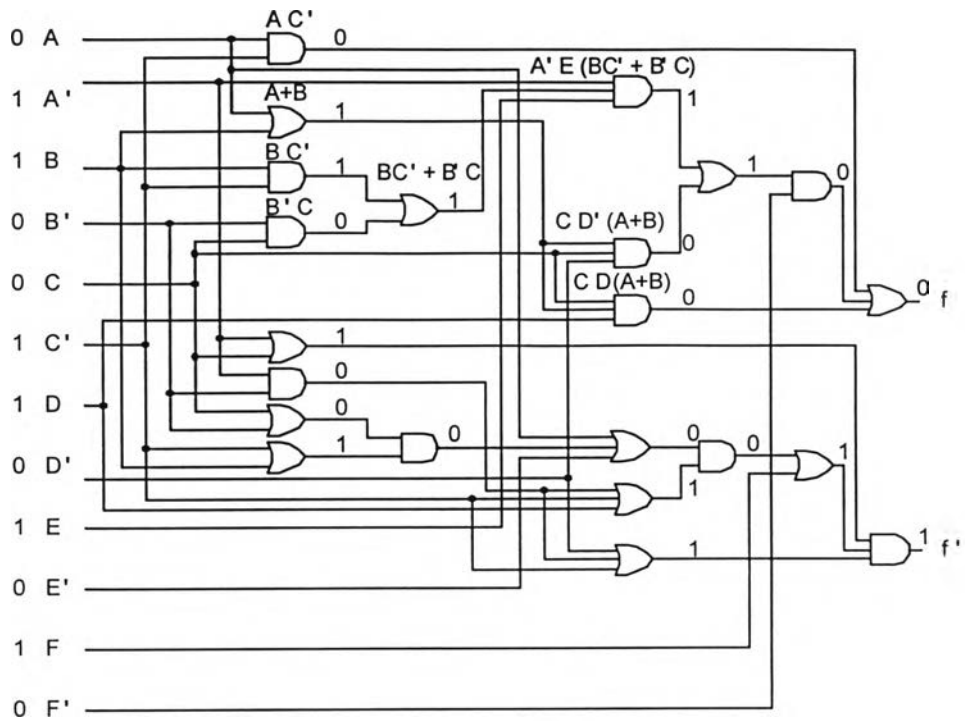
3.2 การวิเคราะห์ลักษณะการส่งผ่านระดับสัญญาณในส่วนวงจรรางคู่

ในการทำงานรางคู่แบบสองขั้นชนิดกลับสู่ศูนย์ พบว่า ในขั้นทำงานส่วนวงจรรางคู่จะมีการส่งผ่านการเปลี่ยนระดับสัญญาณ 0→1 และให้ค่ารหัสตรงรางคู่ที่เอาต์พุต และในขั้นว่างส่วนวงจรรางคู่จะมีการส่งผ่านการเปลี่ยนระดับสัญญาณ 1→0 และให้ค่าตัวแบ่งรอบการทำงานที่เอาต์พุต จึงสามารถวิเคราะห์ลักษณะการส่งผ่านระดับสัญญาณในส่วนวงจรรางคู่สำหรับการออกแบบทั้ง 2 แนวทางได้ดังนี้

3.2.1 การออกแบบโดยใช้ตรรกะรางคู่ที่ไร้ตัวผกผัน

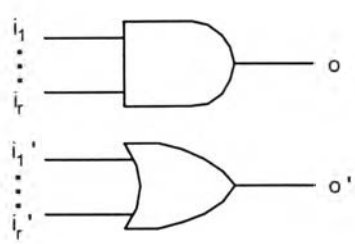
เมื่อนำตัวอย่างส่วนวงจรรางคู่ของฟังก์ชัน f = AC' + CD(A+B) + F'(CD'(A+B) + A'E(BC' + B'C)) มาจำลองการทำงานโดยใช้แบบอินพุต ABCDEF เท่ากับ 010111 ดังแสดงในรูปที่ 3.1

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.1 การจำลองการทำงานในขั้นทำงานของส่วนวงจรรางคู่
ที่ออกแบบโดยใช้ตรรกะรางคู่ที่ไร้ตัวผกผัน

จากรูปจะได้ว่า ส่วนวงจรรางคู่ประกอบด้วยวงจรย่อยสองส่วน คือ ส่วนที่ให้เอาต์พุต f และส่วนที่ให้เอาต์พุต f ' โดยมีเกตแอนด์และเกตออร์คู่กันระหว่างวงจรย่อย เช่น เกตแอนด์ของ AC' ในวงจรย่อย f จะคู่กับเกตออร์ของ A'+C ในวงจรย่อย f ' ซึ่งจะรวมเรียกว่า **คู่เกตแอนด์ออร์** ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 คู่เกตแอนด์ออร์

คู่เกตแอนด์ออร์ จะมีการทำงานในแต่ละขั้นดังนี้

<u>ขั้นทำงาน</u> ซึ่งมีเพียงการเปลี่ยนระดับสัญญาณ 0⟶1 แต่ละคู่เกตแอนด์ออร์จะมีเพียงเกตเดียวที่เอาต์พุตมีการเปลี่ยนระดับสัญญาณ 0⟶1 หรือมีลักษณะเป็นหนึ่งจากสอง (1-out-of-2) ทำให้เอาต์พุตของคู่เกตแอนด์ออร์เป็นค่ารหัสตรงรางคู่

<u>ขั้นว่าง</u> ซึ่งมีเพียงการเปลี่ยนระดับสัญญาณ 1⟶0 เกตในแต่ละคู่เกตแอนด์ออร์ที่ให้เอาต์พุตมีค่าระดับสัญญาณ 1 ในขั้นทำงานจะมีการเปลี่ยนระดับสัญญาณ 1⟶0 และทำให้เอาต์พุตของคู่เกตแอนด์ออร์เป็นค่าตัวแบ่งรอบการทำงาน

จากรูปที่ 3.2 สำหรับแต่ละคู่เกตแอนด์ออร์ สามารถวิเคราะห์การเปลี่ยนระดับสัญญาณที่อินพุต (i_1, i_1') , ..., (i_r, i_r') มีผลต่อเอาต์พุต (o, o') ได้ดังนี้

<u>ขั้นทำงาน</u>

<u>กรณีที่ 1</u> เอาต์พุต (o,o') เปลี่ยนจากค่า (0,0) เป็นค่า (0,1) เมื่ออินพุตอย่างน้อยหนึ่งอินพุตใน $\{ i_1', i_2', ..., i_r' \}$ มีการเปลี่ยนระดับสัญญาณ 0⟶1

<u>กรณีที่ 2</u> เอาต์พุต (o,o') เปลี่ยนจากค่า (0,0) เป็นค่า (1,0) เมื่ออินพุตทุกอินพุตใน $\{ i_1, i_2, ..., i_r \}$ มีการเปลี่ยนระดับสัญญาณ 0⟶1

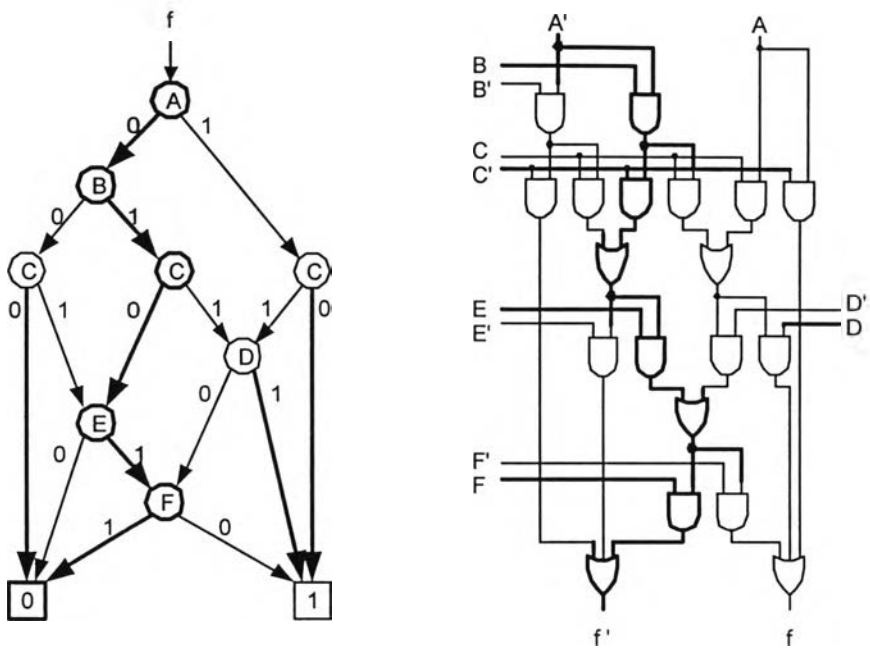
<u>ขั้นว่าง</u>

<u>กรณีที่ 1</u> เอาต์พุต (o,o') เปลี่ยนจากค่า (0,1) เป็นค่า (0,0) เมื่ออินพุตทุกอินพุตใน $\{ i_1', i_2', ..., i_r' \}$ มีการเปลี่ยนระดับสัญญาณ 1⟶0

<u>กรณีที่ 2</u> เอาต์พุต (o,o') เปลี่ยนจากค่า (1,0) เป็นค่า (0,0) เมื่ออินพุตอย่างน้อยหนึ่งอินพุตใน $\{ i_1, i_2, ..., i_r \}$ มีการเปลี่ยนระดับสัญญาณ 1⟶0

3.2.2 การออกแบบโดยใช้แผนภาพตัดสินใจแบบทวิภาคชนิดมีการลดทอนอันดับ

เมื่อนำตัวอย่างส่วนวงจรรางคู่ของฟังก์ชัน f = AC' + CD(A+B) + F'(CD'(A+B) + A'E(BC' + B'C)) มาจำลองการทำงานโดยใช้แบบอินพุต ABCDEF เท่ากับ 010111 ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 การจำลองการทำงานในขั้นทำงานของส่วนวงจรรางคู่
ที่ออกแบบโดยใช้แผนภาพตัดสินใจแบบทวิภาคชนิดมีการลดทอนอันดับ

จากรูปจะได้ว่า ส่วนวงจรรางคู่ประกอบด้วยเกตแอนด์ซึ่งมีการจัดเรียงเป็นเส้นทางเทียบเท่าเส้นเชื่อมในแผนภาพตัดสินใจแบบทวิภาคชนิดมีการลดทอนอันดับ เรียกว่า **เส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์** และเกตออร์ใช้รวมเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์สำหรับบัพในแผนภาพตัดสินใจแบบทวิภาคชนิดมีการลดทอนอันดับที่มีอินพุตมากกว่าหนึ่ง

เกตออร์ และ เส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์ จะมีการทำงานในแต่ละขั้นดังนี้

<u>ขั้นทำงาน</u> ซึ่งมีเพียงการเปลี่ยนระดับสัญญาณ 0⟶1 ส่วนวงจรรางคู่จะมีเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์เพียงหนึ่งเส้นทางที่สายทุกเส้นในเส้นทางนั้นมีการเปลี่ยนระดับสัญญาณ 0⟶1 ทั้งเส้นทางและทำให้เกิดค่ารหัสตรงรางคู่ที่เอาต์พุต (f,f') เมื่อวิเคราะห์ที่แต่ละเกตออร์พบว่า ในเกตออร์ที่เอาต์พุตมีการเปลี่ยนระดับสัญญาณ 0⟶1 เกตออร์นั้นจะมีเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์ที่เป็นอินพุตเพียงหนึ่งเส้นทางที่สายในเส้นทางนั้นมีการเปลี่ยนระดับสัญญาณ 0⟶1 ทั้งเส้นทางจากอินพุตทั้งหมด n เส้นทาง จึงได้ว่า การเปลี่ยนระดับสัญญาณเมื่อพิจารณาแต่ละเกตออร์มีลักษณะเป็นหนึ่งจากทั้งหมด (1-out-of-n)

<u>ขั้นว่าง</u> ซึ่งมีเพียงการเปลี่ยนระดับสัญญาณ 1⟶0 สายที่มีค่าระดับสัญญาณ 1 ในขั้นทำงานจะมีการเปลี่ยนระดับสัญญาณ 1⟶0 และทำให้เส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์ที่มีค่า

ระดับสัญญาณ 1 ทั้งเส้นทางนั้นมีการส่งผ่านการเปลี่ยนระดับสัญญาณ 1⟶0 ตั้งแต่อินพุตของส่วนวงจรรางคู่ไปยังเอาต์พุต และเกิดเป็นค่าตัวแบ่งรอบการทำงานที่เอาต์พุต (f,f')

สรุปการวิเคราะห์การเปลี่ยนระดับสัญญาณในเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์ที่ส่งผลต่อเอาต์พุต (f,f') ได้ดังนี้

ขั้นทำงาน

กรณีที่ 1 เอาต์พุต (f,f') เปลี่ยนจากค่า (0,0) เป็นค่า (0,1) เมื่อมีเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์หนึ่งเส้นทางมีการเปลี่ยนระดับสัญญาณ 0⟶1 ทั้งเส้นทาง และเส้นทางนั้นเชื่อมต่อไปยังเอาต์พุต f '

กรณีที่ 2 เอาต์พุต (f,f') เปลี่ยนจากค่า (0,0) เป็น (1,0) เมื่อมีเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์หนึ่งเส้นทางมีการเปลี่ยนระดับสัญญาณ 0⟶1 ทั้งเส้นทาง และเส้นทางนั้นเชื่อมต่อไปยังเอาต์พุต f

ขั้นว่าง

กรณีที่ 1 เอาต์พุต (f,f') เปลี่ยนจากค่า (0,1) เป็น (0,0) เมื่อเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์ที่เชื่อมเอาต์พุต f ' ในขั้นทำงานมีการเปลี่ยนระดับสัญญาณ 1⟶0

กรณีที่ 2 เอาต์พุต (f,f') เปลี่ยนจากค่า (1,0) เป็น (0,0) เมื่อเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์ที่เชื่อมเอาต์พุต f ในขั้นทำงานมีการเปลี่ยนระดับสัญญาณ 1⟶0

นอกจากนี้ พบว่า เมื่อสิ้นสุดขั้นทำงานส่วนวงจรรางคู่จะมีทั้งสายที่มีค่าระดับสัญญาณ 1 และสายที่มีค่าระดับสัญญาณ 0 แต่เมื่อสิ้นสุดขั้นว่างสายทุกเส้นในส่วนวงจรรางคู่จะต้องมีค่าระดับสัญญาณ 0

3.3 การออกแบบส่วนวงจรตอบรับโดยใช้เกตออร์

เมื่อพิจารณาจากการวิเคราะห์ในหัวข้อ 3.2 ร่วมกับการทำงานของส่วนวงจรตอบรับที่ตรวจสอบการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณภายในส่วนวงจรรางคู่ในการทำงานรางคู่แบบสองขั้นชนิดกลับสู่ศูนย์ พบว่า ในขั้นทำงานส่วนวงจรรางคู่จะมีเพียงการเปลี่ยนระดับสัญญาณ 0⟶1 เพื่อให้ค่ารหัสตรงรางคู่ที่เอาต์พุตและส่วนวงจรตอบรับจะให้สัญญาณแสดงความบริบูรณ์มีการเปลี่ยนระดับสัญญาณ 0⟶1 เพื่อแสดงการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับ

สัญญาณภายในส่วนวงจรรางคู่ และในขั้นว่างส่วนวงจรรางคู่จะมีเพียงการเปลี่ยนระดับสัญญาณ 1→0 เพื่อให้ค่าตัวแบ่งรอบการทำงานที่เอาต์พุตและส่วนวงจรตอบรับจะให้สัญญาณแสดงความบริบูรณ์มีการเปลี่ยนระดับสัญญาณ 1→0 เพื่อแสดงการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณภายในส่วนวงจรรางคู่ จึงได้ว่า การเปลี่ยนระดับสัญญาณที่สัญญาณแสดงความบริบูรณ์มีลักษณะตรงกับการเปลี่ยนระดับสัญญาณภายในส่วนวงจรรางคู่ทั้งในขั้นทำงานและในขั้นว่าง

ดังนั้นจึงสามารถออกแบบส่วนวงจรตอบรับโดยให้สายอินพุตของส่วนวงจรตอบรับได้จากการเลือกกลุ่มสายซึ่งสามารถครอบคลุมทุกการเปลี่ยนระดับสัญญาณภายในส่วนวงจรรางคู่ทั้งในขั้นทำงานและในขั้นว่าง และใช้เพียงเกตออร์ในการตรวจสอบการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณเพื่อให้การเปลี่ยนระดับสัญญาณที่สัญญาณแสดงความบริบูรณ์มีการทำงานสัมพันธ์กับการเปลี่ยนระดับสัญญาณภายในส่วนวงจรรางคู่ ดังนี้

<u>ขั้นทำงาน</u> สายที่เลือกจากส่วนวงจรรางคู่อย่างน้อยหนึ่งเส้นจะมีค่าระดับสัญญาณ 1 ทำให้ส่วนวงจรตอบรับให้สัญญาณแสดงความบริบูรณ์มีการเปลี่ยนระดับสัญญาณ 0→1 โดยมีค่าความหน่วงการเปลี่ยนระดับสัญญาณเป็น K เท่าของค่าความหน่วงการเปลี่ยนระดับสัญญาณสุดท้ายภายในส่วนวงจรรางคู่ เพื่อให้วงจรเชิงผสมที่ได้มีความทนต่อความแปรปรวนความหน่วงที่อัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุด(K)

<u>ขั้นว่าง</u> สายที่เลือกจากส่วนวงจรรางคู่ทุกเส้นจะมีค่าระดับสัญญาณ 0 เพื่อแสดงว่าสายทุกเส้นในส่วนวงจรรางคู่มีค่าระดับสัญญาณ 0 และทำให้ส่วนวงจรตอบรับให้สัญญาณแสดงความบริบูรณ์มีการเปลี่ยนระดับสัญญาณ 1→0 โดยมีค่าความหน่วงการเปลี่ยนระดับสัญญาณเป็น K เท่าของค่าความหน่วงการเปลี่ยนระดับสัญญาณสุดท้ายภายในส่วนวงจรรางคู่ เพื่อให้วงจรเชิงผสมที่ได้มีความทนต่อความแปรปรวนความหน่วงที่อัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุด

การออกแบบส่วนวงจรตอบรับจึงแบ่งการวิเคราะห์ได้เป็นสี่ขั้นตอน คือ การประมาณค่าความหน่วงการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณของส่วนวงจรรางคู่ การวิเคราะห์ลักษณะการทำงานของเกตในส่วนวงจรรางคู่เพื่อการเลือกสาย การคำนวณค่าความหน่วงการเปลี่ยนระดับสัญญาณของสัญญาณแสดงความบริบูรณ์ และการเรียงเกตออร์ในส่วนวงจรตอบรับให้ได้ค่าความหน่วงการเปลี่ยนระดับสัญญาณที่สัญญาณแสดงความบริบูรณ์ตามต้องการ

3.3.1 การประมาณค่าความหน่วงการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณของส่วนวงจรรางคู่

เนื่องจากการออกแบบส่วนวงจรรางคู่ทั้งการออกแบบโดยใช้ตรรกะรางคู่ที่ไร้ตัวผกผันและการออกแบบโดยใช้แผนภาพตัดสินใจแบบทวิภาคชนิดมีการลดทอนอันดับใช้เพียงเกตแอนด์และเกตออร์ จึงสามารถประมาณค่าความหน่วงของการเปลี่ยนระดับสัญญาณจากลักษณะการทำงานของเกต ดังนี้

กำหนดให้

$Gd_{0\rightarrow 1,\ 1\rightarrow 0}$ = ค่าความหน่วงเกตสำหรับการเปลี่ยนระดับสัญญาณ 0⟶1 และ 1⟶0

$Wd_{a,b}$ = ค่าความหน่วงสายที่เชื่อมจุด a และ b

$\int(x)$ = ค่าความหน่วงการเปลี่ยนระดับสัญญาณ 0⟶1 ที่จุด x บนสาย

$\urcorner(x)$ = ค่าความหน่วงการเปลี่ยนระดับสัญญาณ 1⟶0 ที่จุด x บนสาย

สำหรับเกตแอนด์

$$\int(\text{เอาต์พุต}) = \int_{\text{สูงสุด}}(\text{อินพุต}) + Gd_{0\rightarrow 1} \quad (3.1)$$

$$\urcorner(\text{เอาต์พุต}) = \urcorner_{\text{ต่ำสุด}}(\text{อินพุต}) + Gd_{1\rightarrow 0} \quad (3.2)$$

สำหรับเกตออร์

$$\int(\text{เอาต์พุต}) = \int_{\text{ต่ำสุด}}(\text{อินพุต}) + Gd_{0\rightarrow 1} \quad (3.3)$$

$$\urcorner(\text{เอาต์พุต}) = \urcorner_{\text{สูงสุด}}(\text{อินพุต}) + Gd_{1\rightarrow 0} \quad (3.4)$$

เมื่อการเปลี่ยนระดับสัญญาณส่งผ่านสายจากจุด a ไปยัง b

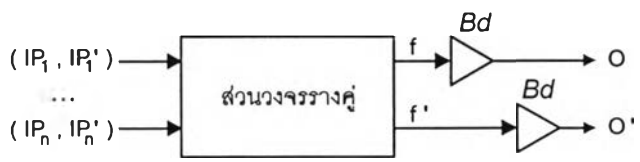
$$\int(b) = \int(a) + Wd_{a,b} \quad (3.5)$$

$$\urcorner(b) = \urcorner(a) + Wd_{a,b} \quad (3.6)$$

เมื่อคำนวณค่าความหน่วงที่แต่ละจุดในส่วนวงจรรางคู่จากอินพุตไปยังเอาต์พุต จะสามารถแบ่งการประมาณค่าความหน่วงของส่วนวงจรรางคู่ตามการวิเคราะห์ความแปรปรวนความหน่วง ได้ดังนี้

3.3.1.1 กรณีที่ไม่เกิดความแปรปรวนความหน่วง

เมื่อไม่เกิดความแปรปรวนความหน่วงหรืออัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุดมีค่าเท่ากับ 1.00 จะได้ว่า ค่าความหน่วงประมาณของเกตและสายในการออกแบบวงจรระดับเกตมีค่าตรงกับค่าความหน่วงจริงในการออกแบบวงจรระดับเลย์เอาท์ และทำให้ค่ารหัสตรงรางคู่ที่เอาต์พุตของส่วนวงจรรางคู่ซึ่งเป็นค่าที่ถูกต้องในขั้นทำงานสามารถส่งเป็นเอาต์พุตของวงจรเชิงผสมแบบอสมวารได้โดยไม่ต้องสร้างส่วนวงจรตอบรับแต่ใช้การต่อเพิ่มบัฟเฟอร์ที่เอาต์พุตของส่วนวงจรรางคู่เพื่อประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณแทน ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 วงจรเชิงผสมแบบอสมวารที่ไม่ไวต่อความหน่วงชนิดปรับมาตราส่วนได้ ซึ่งได้จากการต่อเพิ่มบัฟเฟอร์ที่เอาต์พุตของส่วนวงจรรางคู่

ค่าความหน่วงของบัฟเฟอร์สำหรับประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณในส่วนวงจรรางคู่คำนวณได้ดังนี้

กำหนดให้

WKP	=	ค่าความหน่วงในขั้นทำงานของส่วนวงจรรางคู่
IDP	=	ค่าความหน่วงในขั้นว่างของส่วนวงจรรางคู่
Bd	=	ค่าความหน่วงบัฟเฟอร์

เมื่อกำหนดให้เอาต์พุตของส่วนวงจรรางคู่เป็น (f,f')

$$WKP = \int_{\text{ต่ำสุด}} (f,f') \quad (3.7)$$

$$IDP = \int_{\text{ต่ำสุด}} (f,f') \quad (3.8)$$

$$Bd = \left(\int, \int\right)_{\text{สูงสุด}} (\text{ทุกจุด}) - \text{ค่าต่ำสุด (WKP,IDP)} \quad (3.9)$$

3.3.1.2 กรณีที่เกิดความแปรปรวนความหน่วง

เมื่อเกิดความแปรปรวนความหน่วงหรือมีการกำหนดอัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุด(K) ในการออกแบบวงจร จะได้ว่า การออกแบบวงจรระดับเกตมีความคลาดเคลื่อนในการประมาณค่าความหน่วงของเกตและสาย และทำให้ต้องสร้างส่วนวงจรตอบรับ

เพื่อประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณโดยให้ การเปลี่ยนระดับสัญญาณที่สัญญาณแสดงความบริบูรณ์มีค่าความหน่วงเป็น K เท่าของค่าความหน่วงของส่วนวงจรรางคู่ ซึ่งค่าความหน่วงของส่วนวงจรรางคู่สามารถคำนวณได้จากค่าความหน่วงของการเปลี่ยนระดับสัญญาณสุดท้ายในส่วนวงจรรางคู่ ดังนี้

$$WKP = \int_{\text{สูงสุด}} (\text{ทุกจุด}) \qquad (3.10)$$

$$IDP = \int_{\text{สูงสุด}} (\text{ทุกจุด}) \qquad (3.11)$$

3.3.2 การวิเคราะห์ลักษณะการทำงานของเกตในส่วนวงจรรางคู่เพื่อการเลือกสาย

เมื่อส่วนวงจรตอบรับออกแบบโดยใช้เกตออร์ พบว่า ค่าระดับสัญญาณ 0 ที่เอาต์พุตของเกตออร์สามารถใช้ประกันได้ว่าค่าระดับสัญญาณที่ทุกอินพุตเป็น 0 ดังนั้นการประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณในขั้นว่างสามารถออกแบบได้โดยให้ส่วนวงจรตอบรับมีสายอินพุตเป็นกลุ่มสายที่เลือกจากส่วนวงจรรางคู่ซึ่งสามารถครอบคลุมทุกการเปลี่ยนระดับสัญญาณ 1→0 และสามารถแบ่งลำดับการวิเคราะห์ในการเลือกสายเป็นสองขั้นตอน คือ การเลือกสายที่มุ่งพิจารณาให้ครอบคลุมทุกการเปลี่ยนระดับสัญญาณ1→0 โดยไม่พิจารณาผลของความแปรปรวนความหน่วง และการปรับแต่งวิธีการเลือกสายในขั้นตอนแรกให้รวมผลของความแปรปรวนความหน่วง ซึ่งสรุปได้ดังนี้

3.3.2.1 การเลือกสายเมื่อไม่พิจารณาผลของความแปรปรวนความหน่วง

เมื่อไม่พิจารณาผลของความแปรปรวนความหน่วง การเลือกสายจะมุ่งไปที่การวิเคราะห์ลักษณะการส่งผ่านการเปลี่ยนระดับสัญญาณ 1→0 ภายในส่วนวงจรรางคู่ ซึ่งแบ่งการเลือกสายตามแนวทางการออกแบบส่วนวงจรรางคู่เป็น 2 แบบ ดังนี้

1. การออกแบบโดยใช้ตรรกะรางคู่ที่ไร้ตัวผกผัน

จากการวิเคราะห์ในหัวข้อ 3.2 การเปลี่ยนระดับสัญญาณที่เอาต์พุตของแต่ละคู่เกตแอนด์ออร์มีลักษณะเป็นหนึ่งจากสอง การเลือกสายจึงแบ่งการพิจารณาเป็นแต่ละคู่เกตแอนด์ออร์ดังแสดงในรูปที่ 3.2 และแยกกรณีของค่ารหัสตรงรางคู่ที่เอาต์พุต (o,o') ได้ดังนี้

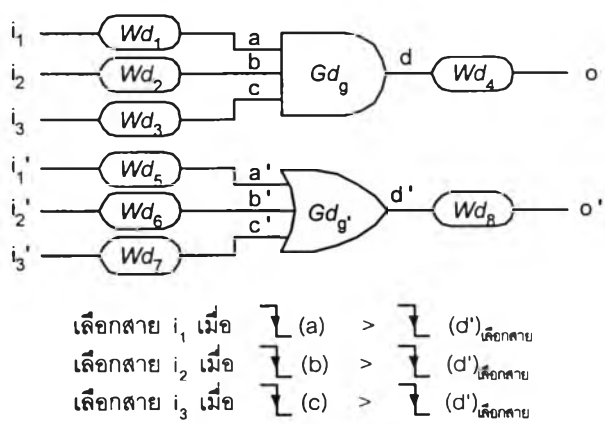
<u>กรณีที่ 1</u> ค่าเอาต์พุต (o,o') เท่ากับ (0,1) แสดงว่า

ก. ทุกอินพุตของเกตออร์มีค่าระดับสัญญาณ 1 และทุกอินพุตของเกตแอนด์มีค่าระดับสัญญาณ 0

ข. อินพุตของเกตแอนด์และอินพุตของเกตออร์อย่างน้อยหนึ่งอินพุตมีค่าระดับสัญญาณ 0 และมีค่าระดับสัญญาณ 1 ตามลำดับ

จากลักษณะการทำงานของเกตออร์ที่การเปลี่ยนระดับสัญญาณ 1⟶0 ที่เอาต์พุตเกิดเมื่อทุกการเปลี่ยนระดับสัญญาณ 1⟶0 ที่ทุกอินพุตเสร็จสิ้นแล้ว ดังนั้น การเลือกสายจึงเลือกสายเอาต์พุตของเกตออร์เพื่อประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณ 1⟶0 ที่ทุกสายอินพุตของเกตออร์

นอกจากนี้พบว่า ที่เกตแอนด์ซึ่งสายอินพุตบางสายมีค่าระดับสัญญาณ 1 การเลือกสายสามารถใช้ค่าความหน่วงการเปลี่ยนระดับสัญญาณ 1⟶0 ที่สายเอาต์พุตของเกตออร์ในการประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณ 1⟶0 ในสายอินพุตของเกตแอนด์สายที่มีค่าความหน่วงการเปลี่ยนระดับสัญญาณ 1⟶0 น้อยกว่าได้ ดังนั้น การเลือกสายสำหรับเกตแอนด์จึงเลือกเฉพาะสายอินพุตที่มีค่าความหน่วงการเปลี่ยนระดับสัญญาณ 1⟶0 มากกว่าค่าความหน่วงการเปลี่ยนระดับสัญญาณที่สายเอาต์พุตของเกตออร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 การเปรียบเทียบค่าความหน่วงในการเลือกสายจากส่วนวงจรรางคู่ที่ออกแบบโดยใช้ตรรกะรางคู่ที่ไร้ตัวผกผัน

การเปรียบเทียบค่าความหน่วงใช้ค่าที่คำนวณจากลักษณะการทำงานของเกต คือ สมการที่ 3.2 และ 3.4 เปรียบเทียบกับค่าความหน่วงที่ต่ำสุด คือ

กำหนดให้

$\tau_{(x)_{เลือกสาย}}$ = ค่าความหน่วงการเปลี่ยนระดับสัญญาณ 1⟶0 ที่จุด x ในการเลือกสาย

สำหรับเกตแอนด์และเกตออร์

$$\tau_{(เอาต์พุต)_{เลือกสาย}} = \tau_{ต่ำสุด\ (อินพุต)_{เลือกสาย}} + Gd_{1\rightarrow 0} \qquad (3.12)$$

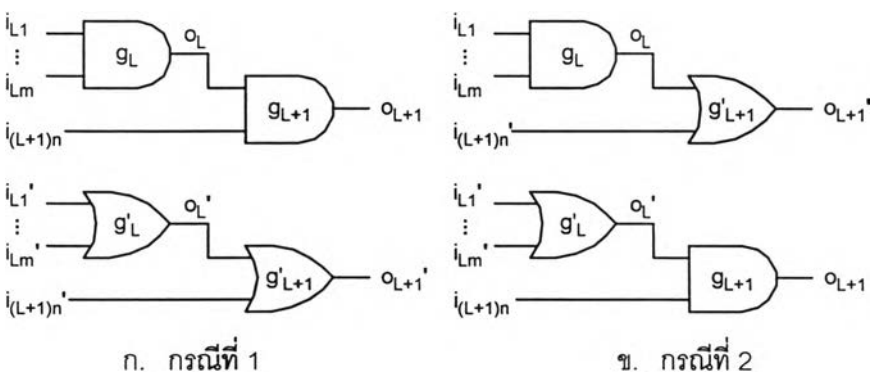
โดยค่าความหน่วงของสายอินพุตของเกตแอนด์คิดจากค่าความหน่วงการเปลี่ยนระดับสัญญาณที่จุดปลายของสาย และค่าความหน่วงของสายเอาต์พุตของเกตออร์คิดจากค่าความหน่วงการเปลี่ยนระดับสัญญาณที่จุดต้นของสาย

กรณีที่ 2 ค่าเอาต์พุต (o,o') เท่ากับ (1,0) แสดงว่า

ก. ทุกอินพุตของเกตแอนด์มีค่าระดับสัญญาณ 1 และทุกอินพุตของเกตออร์มีค่าระดับสัญญาณ 0

ในกรณีนี้พบว่า มีเพียงสายอินพุตและสายเอาต์พุตของเกตแอนด์เท่านั้นที่มีค่าระดับสัญญาณ 1 ดังนั้น การประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณ 1⟶0 ที่กลุ่มสายอินพุตของเกตแอนด์จึงใช้การเลือกสายอินพุตของเกตแอนด์ที่มีค่าความหน่วงการเปลี่ยนระดับสัญญาณ 1⟶0 สูงสุดเพียงหนึ่งเส้นเท่านั้น ทั้งนี้ สายเอาต์พุตของเกตแอนด์สามารถพิจารณาเป็นสายอินพุตของคู่เกตแอนด์ออร์คู่ถัดไปในการเลือกสายได้

สรุปได้ว่า เมื่อพิจารณาแต่ละคู่เกตแอนด์ออร์การเลือกสายของเกตแอนด์จะพิจารณาเลือกเฉพาะสายอินพุต แต่การเลือกสายของเกตออร์จะพิจารณาเลือกเฉพาะสายเอาต์พุต ซึ่งเมื่อแต่ละคู่เกตแอนด์ออร์เรียงต่อกันดังแสดงในรูปที่ 3.6 สายเอาต์พุตของเกตออร์สามารถพิจารณาเป็นสายอินพุตของเกตถัดไปและปรับแต่งการเลือกสาย ได้ดังนี้



ก. กรณีที่ 1 ข. กรณีที่ 2

รูปที่ 3.6 การเรียงต่อของคู่เกตแอนด์ออร์ในส่วนวงจรรางคู่ที่ออกแบบโดยใช้ตรรกะรางคู่ที่ไร้ตัวผกผัน

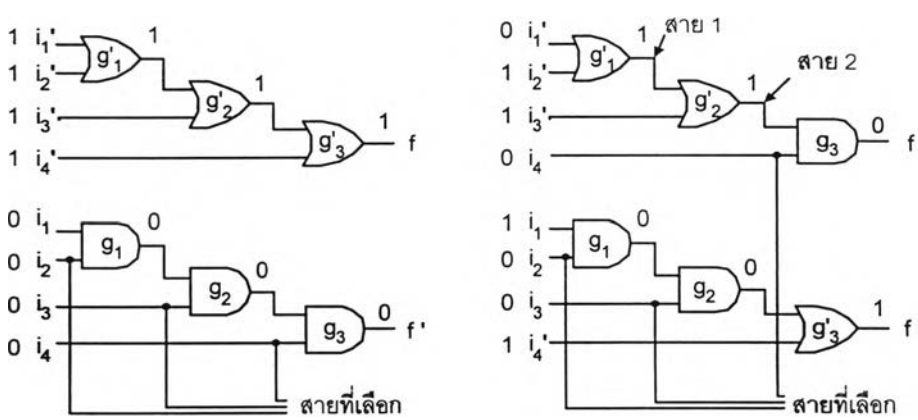
<u>กรณีที่ 1</u> เอาต์พุตของเกตออร์เช่น g'_L ต่อเป็นอินพุตของเกตออร์ถัดไปเช่น g'_{L+1}

โดยใช้การวิเคราะห์ข้างต้นจะได้ว่า สายเอาต์พุตของเกตออร์ g'_{L+1} สามารถประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณ 1⟶0 ที่สายอินพุตและสายเอาต์พุตของเกตออร์ g'_L ได้ ทำให้การเลือกสายไม่จำเป็นต้องเลือกสายเอาต์พุตของเกตออร์ g'_L ดังกล่าว

<u>กรณีที่ 2</u> เอาต์พุตของเกตออร์เช่น g'_L ต่อเป็นอินพุตของเกตแอนด์ถัดไปเช่น g_{L+1}

โดยใช้การวิเคราะห์ข้างต้นจะได้ว่า สายเอาต์พุตของเกตออร์ g'_{L+1} และสายอินพุตของเกตแอนด์ g_{L+1} ที่มีค่าความหน่วงการเปลี่ยนระดับสัญญาณ 1⟶0 สูงสุดสามารถประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณ 1⟶0 ที่สายเอาต์พุตของเกตออร์ g'_L ได้ ทำให้การเลือกสายไม่จำเป็นต้องเลือกสายเอาต์พุตของเกตออร์ g'_L ดังกล่าว

นอกจากนี้พบว่า การเลือกสายไม่ต้องเลือกคู่สายเอาต์พุต (f,f') ของส่วนวงจรรางคู่ เนื่องจากคู่สายดังกล่าวได้ต่อเป็นอินพุตของอุปกรณ์ซนิดซี ซึ่งการเปลี่ยนระดับสัญญาณที่เอาต์พุตของอุปกรณ์ซนิดซีสามารถใช้ตรวจสอบการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณทั้ง 0⟶1 ในขั้นทำงานและ 1⟶0 ในขั้นว่างได้ แต่หากไม่มีการเลือกสายเอาต์พุตของเกตออร์ในส่วนวงจรรางคู่จะทำให้ เมื่อส่วนวงจรรางคู่ทำงานในบางแบบอินพุตจะมีโอกาสที่กลุ่มสายที่เลือกทุกสายมีค่าระดับสัญญาณ 0 และไม่สามารถครอบคลุมการทำงานทั้งในขั้นทำงานและขั้นว่างในแบบอินพุตนั้น ๆ ได้ ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 กรณี ดังแสดงในรูปที่ 3.7



ก. การเรียงต่อเฉพาะเกตแบบเดียว ข. การเรียงต่อสลับเกต

รูปที่ 3.7 กรณีของส่วนวงจรรางคู่ที่ไม่มีการเลือกสายเอาต์พุตของเกตออร์

กรณีที่ 1 การเรียงต่อเฉพาะเกตแบบเดียว

ส่วนวงจรรางคู่กรณีนี้มีลักษณะเทียบเท่าคู่เกตแอนด์ออร์เพียงคู่เดียว ทำให้การประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณสามารถใช้การต่อเพิ่มบัฟเฟอร์ที่เอาต์พุตของส่วนวงจรรางคู่โดยไม่ต้องสร้างส่วนวงจรตอบรับ ดังแสดงในรูปที่ 3.4

ค่าความหน่วงของบัฟเฟอร์สำหรับประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณเมื่อกำหนดอัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุด(K) ในการออกแบบวงจร คำนวณได้ดังนี้

$$Bd = K(\lambda, \tau)_{สูงสุด} \text{ (ทุกจุดยกเว้น f และ f')} - (\lambda, \tau)_{ต่ำสุด} (f, f') \qquad (3.13)$$

กรณีที่ 2 การเรียงต่อสลับเกต

จากตัวอย่างแบบอินพุตในรูปที่ 3.7(ข) สายที่เลือกทุกสายจะมีค่าระดับสัญญาณ 0 ดังนั้น การเลือกสายจึงต้องบังคับเลือกสายเอาต์พุตของเกตออร์ที่เป็นอินพุตของเกตแอนด์ ซึ่งในกรณีนี้สายดังกล่าวจะมีค่าระดับสัญญาณ 1 เช่นสาย 2 ในรูป ทั้งนี้สายซึ่งเป็นอินพุตของเกตออร์เช่นสาย 1 ยังคงไม่ต้องเลือก

สรุปขั้นตอนการเลือกสาย ดังแสดงในรูปที่ 3.8

1. สำหรับแต่ละคู่เกตแอนด์ออร์ วิเคราะห์จากอินพุตของวงจรไปยังเอาต์พุต
   - 1.1 เลือกสายเอาต์พุตของเกตออร์ g'_L ที่ต่อเป็นอินพุตของเกตแอนด์ g_{L+1}
   - 1.2 เลือกสายอินพุตของเกตแอนด์ เมื่อ

     τ (สายอินพุตของเกตแอนด์) > τ (สายเอาต์พุตของเกตออร์) $_{เลือกสาย}$

     โดย ค่าความหน่วงของสายอินพุตของเกตแอนด์คิดที่จุดปลายของสาย

     และ ค่าความหน่วงของสายเอาต์พุตของเกตออร์คิดที่จุดต้นของสาย
   - 1.3 ถ้าไม่มีสายอินพุตของเกตแอนด์ถูกเลือก

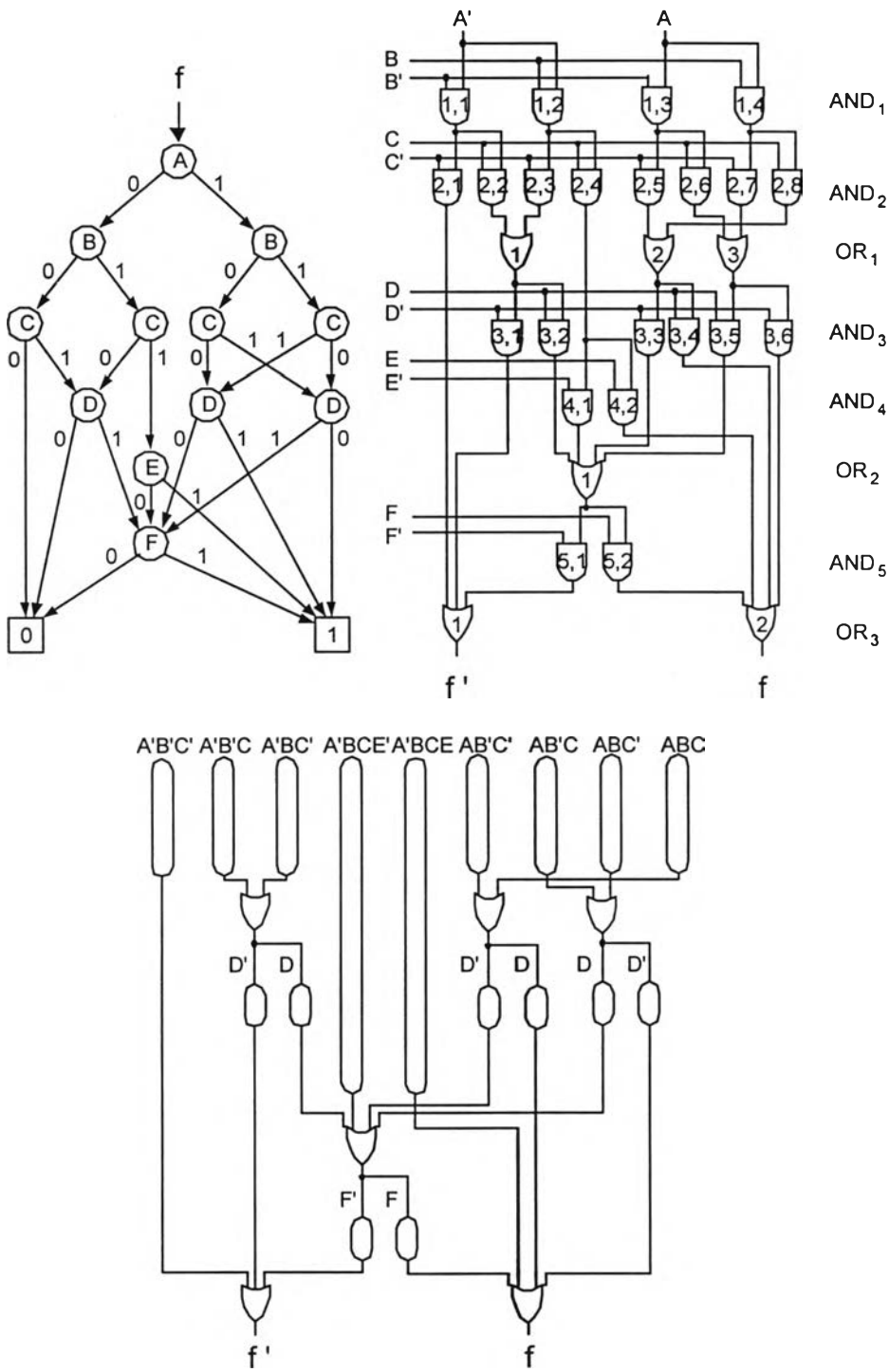
     ให้เลือกสายที่มี $\tau_{สูงสุด}$ (สายอินพุตของเกตแอนด์)
2. ถ้าไม่มีสายเอาต์พุตของเกตออร์ถูกเลือก

   ให้เลือกสายที่มี $\tau_{สูงสุด}$ (สายเอาต์พุตของเกตออร์) $_{เลือกสาย}$

รูปที่ 3.8 ขั้นตอนการเลือกสายเมื่อไม่พิจารณาผลของความแปรปรวนความหน่วงสำหรับส่วนวงจรรางคู่ที่ออกแบบโดยใช้ตรรกะรางคู่ที่ไร้ตัวผกผัน

2. การออกแบบโดยใช้แผนภาพตัดสินใจแบบทวิภาคชนิดมีการลดทอนอันดับ

ในการเลือกสายจะให้รูปที่ 3.9 แสดงตัวอย่างการแบ่งกลุ่มเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์ที่เป็นอินพุตของแต่ละเกตออร์



รูปที่ 3.9 ตัวอย่างการแบ่งกลุ่มเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์ที่เป็นอินพุตของแต่ละเกตออร์

เมื่อแบ่งกลุ่มเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์โดยการวิเคราะห์จากอินพุตของวงจรหรือจากเอาต์พุตของเกตออร์ที่ระดับ L-1 จนถึงอินพุตของเกตออร์ที่ระดับ L หรือถึงเอาต์พุตของวงจร จากรูปที่ 3.9 จะได้กลุ่มเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์ที่เป็นอินพุตของแต่ละเกตออร์ ดังนี้

เกตออร์	กลุ่มเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์ที่เป็นอินพุตของแต่ละเกตออร์
$OR_{1,1}$	1. A' B' $AND_{1,1}$ เอาต์พุต($AND_{1,1}$) C $AND_{2,2}$ เอาต์พุต($AND_{2,2}$) 2. A' B $AND_{1,2}$ เอาต์พุต($AND_{1,2}$) C' $AND_{2,3}$ เอาต์พุต($AND_{2,3}$)
$OR_{1,2}$	1. A B' $AND_{1,3}$ เอาต์พุต($AND_{1,3}$) C' $AND_{2,5}$ เอาต์พุต($AND_{2,5}$) 2. A B $AND_{1,4}$ เอาต์พุต($AND_{1,4}$) C $AND_{2,8}$ เอาต์พุต($AND_{2,8}$)
$OR_{1,3}$	1. A B' $AND_{1,3}$ เอาต์พุต($AND_{1,3}$) C $AND_{2,6}$ เอาต์พุต($AND_{2,6}$) 2. A B $AND_{1,4}$ เอาต์พุต($AND_{1,4}$) C' $AND_{2,7}$ เอาต์พุต($AND_{2,7}$)
$OR_{2,1}$	1. เอาต์พุต($OR_{1,1}$) D $AND_{3,2}$ เอาต์พุต($AND_{3,2}$) 2. A' B $AND_{1,2}$ เอาต์พุต($AND_{1,2}$) C $AND_{2,4}$ เอาต์พุต($AND_{2,4}$) E' $AND_{4,1}$ เอาต์พุต($AND_{4,1}$) 3. เอาต์พุต($OR_{1,2}$) D' $AND_{3,3}$ เอาต์พุต($AND_{3,3}$) 4. เอาต์พุต($OR_{1,3}$) D $AND_{3,5}$ เอาต์พุต($AND_{3,5}$)
$OR_{3,1}$	1. A' B' $AND_{1,1}$ เอาต์พุต($AND_{1,1}$) C' $AND_{2,1}$ เอาต์พุต($AND_{2,1}$) 2. เอาต์พุต($OR_{1,1}$) D' $AND_{3,1}$ เอาต์พุต($AND_{3,1}$) 3. เอาต์พุต($OR_{2,1}$) F' $AND_{5,1}$ เอาต์พุต($AND_{5,1}$)
$OR_{3,2}$	1. เอาต์พุต($OR_{2,1}$) F $AND_{5,2}$ เอาต์พุต($AND_{5,2}$) 2. A' B $AND_{1,2}$ เอาต์พุต($AND_{1,2}$) C $AND_{2,4}$ เอาต์พุต($AND_{2,4}$) E $AND_{4,2}$ เอาต์พุต($AND_{4,2}$) 3. เอาต์พุต($OR_{1,2}$) D $AND_{3,4}$ เอาต์พุต($AND_{3,4}$) 4. เอาต์พุต($OR_{1,3}$) D' $AND_{3,6}$ เอาต์พุต($AND_{3,6}$)

จากการวิเคราะห์ในหัวข้อ 3.2 จะได้ว่า การเปลี่ยนระดับสัญญาณที่กลุ่มเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์ที่เป็นอินพุตของแต่ละเกตออร์มีลักษณะเป็นหนึ่งจากทั้งหมด การเลือกสายจึงแบ่งการพิจารณาเป็น การประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณ 1⟶0 ในแต่ละเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์ การพิจารณารวมกลุ่มเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์ที่เป็นอินพุตของแต่ละเกตออร์ และการพิจารณารวมทุกเกตออร์ภายในส่วนวงจรรางคู่ ในการวิเคราะห์พบว่า

T 1863018

สำหรับแต่ละเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์

สายที่มีค่าความหน่วงการเปลี่ยนระดับสัญญาณ 1⟶0 สูงสุดสามารถใช้ประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณ 1⟶0 ของทุกสายในเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์นั้น เรียกว่า **สายหลักของเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์**

สำหรับการรวมกลุ่มเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์ที่เป็นอินพุตของแต่ละเกตออร์

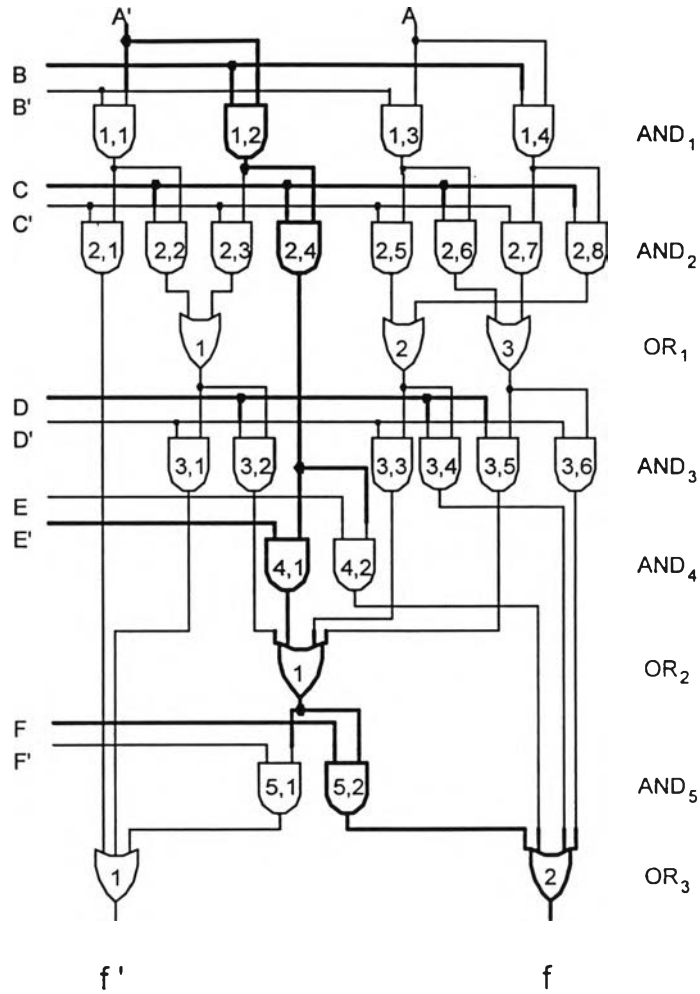
พิจารณากลุ่มเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์แบ่งตามการเกิดระดับสัญญาณที่เอาต์พุตของเกตออร์ ได้ดังนี้

กรณีที่ 1 เอาต์พุตของเกตออร์มีค่าระดับสัญญาณ 1

แสดงว่าเกตออร์นี้มีเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์หนึ่งเส้นทางที่มีค่าระดับสัญญาณ 1 ตลอดทั้งเส้นทาง และสามารถใช้สายหลักของเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์นี้ในการประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณ 1⟶0 ของทุกสายในเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์ดังกล่าว

สำหรับเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์ที่มีค่าระดับสัญญาณ 0 พบว่า อาจมีสายบางเส้นมีค่าระดับสัญญาณ 1 และจะไม่สามารถประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณ 1⟶0 ได้หากสายหลักของเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์นี้มีค่าระดับสัญญาณ 0 ดังนั้นการประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณจึงต้องใช้ค่าความหน่วงการเปลี่ยนระดับสัญญาณของสายหลักของเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์ที่มีค่าระดับสัญญาณ 1 แทน

เช่น เมื่อนำตัวอย่างส่วนวงจรรางคู่ในรูปที่ 3.9 มาจำลองการทำงานโดยใช้แบบอินพุต ABCDEF เท่ากับ 011101 ดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 การจำลองการทำงานของส่วนวงจรรางคู่
สำหรับแบบอินพุต ABCDEF = 011101

จากรูป จะได้ว่า เกต $OR_{2,1}$ มีค่าระดับสัญญาณ 1 ที่เส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์สอง และสาย D ในเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์หนึ่งและเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์สี่ หากสายหลักของเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์หนึ่งและสายหลักของเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์สี่เป็นสายเอาต์พุต($OR_{1,1}$) และสายเอาต์พุต($OR_{1,3}$) ซึ่งสายทั้งสองมีค่าระดับสัญญาณ 0 พบว่า จะไม่สามารถประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณ 1⟶0 ในสาย D ได้ และทำให้ต้องใช้ค่าความหน่วงการเปลี่ยนระดับสัญญาณของสายหลักของเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์สองซึ่งเป็นเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์ที่มีค่าระดับสัญญาณ 1 ในแบบอินพุตนี้สำหรับประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณในสาย D แทน

เมื่อพิจารณารวมทุกเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์ที่เป็นอินพุตของแต่ละเกตออร์ การเลือกสายเพื่อประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณ 1→0 จึงเลือกสายหลักของเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์ที่มีค่าความหน่วงการเปลี่ยนระดับสัญญาณ 1→0 ต่ำสุด ร่วมกับสายในเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์อื่นที่มีค่าความหน่วงมากกว่า

จากการที่ในขั้นทำงานจะมีเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์เพียงหนึ่งเส้นทางที่มีการเปลี่ยนระดับสัญญาณ 0→1 ทั้งเส้นทางและให้เอาต์พุตของเกตออร์มีค่าระดับสัญญาณ 1 และในขั้นว่างเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์นั้นจะมีการเปลี่ยนระดับสัญญาณ 1→0 และให้เอาต์พุตของเกตออร์มีค่าระดับสัญญาณ 0 ทำให้สามารถใช้สายเอาต์พุตของเกตออร์ในการประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณ 1→0 ของสายในกลุ่มเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์ที่เป็นอินพุตของเกตออร์นั้น ดังนี้

กำหนดให้

สายหลักของการต่อเชื่อมเกตออร์ แทน สายที่มีค่าความหน่วงการเปลี่ยนระดับสัญญาณ 1→0 สูงสุด ระหว่าง สายหลักของเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์ที่มีค่าความหน่วงการเปลี่ยนระดับสัญญาณ 1→0 ต่ำสุด กับ สายเอาต์พุตของเกตออร์

สรุปได้ว่า การเลือกสายสำหรับแต่ละเกตออร์เป็น การเลือกสายหลักของการต่อเชื่อมเกตออร์ ร่วมกับ สายในเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์ที่มีค่าความหน่วงมากกว่า ซึ่งเทียบได้กับการพิจารณาสายเอาต์พุตของเกตออร์เป็นส่วนหนึ่งของแต่ละเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์ที่เป็นอินพุตของเกตออร์นั้น

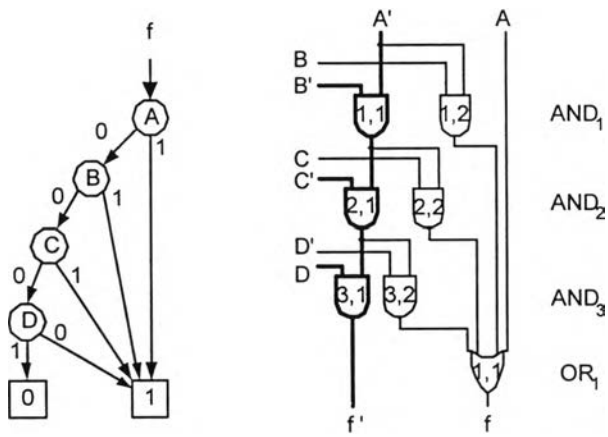
กรณีที่ 2 เอาต์พุตของเกตออร์มีค่าระดับสัญญาณ 0

แสดงว่า เกตออร์นี้ไม่มีเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์ที่มีค่าระดับสัญญาณ 1 ตลอดทั้งเส้นทาง และสำหรับกลุ่มเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์ที่เป็นอินพุตของเกตออร์ พบว่า อาจมีสายบางเส้นมีค่าระดับสัญญาณ 1 ซึ่งจะไม่สามารถประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณ 1→0 ได้หากกลุ่มสายที่เลือกในกรณีที่หนึ่งทุกสายมีค่าระดับสัญญาณ 0 ดังนั้นการประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณจึงต้องใช้ค่าความหน่วงการเปลี่ยนระดับสัญญาณของสายหลักของการต่อเชื่อมเกตออร์ในเกตออร์ที่เอาต์พุตมีค่าระดับสัญญาณ 1 แทน ดังนี้

กำหนดให้

สายหลักของวงจร แทน สายหลักของการต่อเชื่อมเกตออร์ที่มีค่าความ**หน่วงการ**เปลี่ยนระดับสัญญาณ 1→0 ต่ำสุด

และสรุปการเลือกสายเมื่อพิจารณารวมเกตออร์ของทั้งส่วนวงจรรางคู่เป็น การเลือกสายหลักของวงจร**ร่วมกับสายในเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์ทุกเส้นทางของวงจรที่มีค่า**ความหน่วงการเปลี่ยนระดับสัญญาณมากกว่าเพื่อให้สามารถพิจารณารวมเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์ที่ไม่เป็นอินพุตของเกตออร์แต่เป็นเอาต์พุตของวงจร เช่น เส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์ซึ่งประกอบด้วย A' B' $AND_{1,1}$ เอาต์พุต($AND_{1,1}$) C' $AND_{2,1}$ เอาต์พุต($AND_{2,1}$) D $AND_{3,1}$ เอาต์พุต($AND_{3,1}$) **ในรูปที่** 3.11



รูปที่ 3.11 ตัวอย่างเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์ที่เป็นเอาต์พุตของวงจร

นอกจากนี้ จากลักษณะการทำงานของเกตออร์ พบว่าหากมีการเลือกสายเอาต์พุตของเกตออร์แล้ว สามารถนำสายอินพุตที่ถูกเลือกออกได้

สรุปขั้นตอนการเลือกสายดังแสดง**ในรูปที่** 3.12 ทั้งนี้การเปรียบเทียบค่า**ความหน่วง**ของสาย**ใช้**ค่าความหน่วงการเปลี่ยนระดับสัญญาณที่จุดปลายของสาย และใช้ค่า**ความหน่วง**ที่ต่ำสุดคือสมการที่ 3.12 เท่านั้น

1. สำหรับแต่ละเกตออร์ วิเคราะห์จากอินพุตของวงจรไปยังเอาต์พุต
   1.1 สำหรับแต่ละเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์
   หา สายหลักของเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์ คือ สายที่ $\uparrow_{\text{สูงสุด}}$ (สายในเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์) $_{\text{เลือกสาย}}$
   1.2 หา สายหลักของการต่อเชื่อมเกตออร์ คือ สายที่
   $\uparrow_{\text{สูงสุด}}$ ($\uparrow_{\text{ต่ำสุด}}$(สายหลักของเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์) $_{\text{เลือกสาย}}$,
   สายเอาต์พุตของเกตออร์) $_{\text{เลือกสาย}}$
   1.3 เลือก สายหลักของการต่อเชื่อมเกตออร์
   1.4 สำหรับแต่ละเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์
   เลือกสายในเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์ เมื่อ
   $\uparrow$ (สายในเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์) $_{\text{เลือกสาย}}$ > $\uparrow$ (สายหลักของการต่อเชื่อมเกตออร์) $_{\text{เลือกสาย}}$
2. หา สายหลักของวงจร คือ สายที่ $\uparrow_{\text{ต่ำสุด}}$ (สายหลักของการต่อเชื่อมเกตออร์) $_{\text{เลือกสาย}}$
3. เลือก สายหลักของวงจร
4. สำหรับแต่ละเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์ในวงจร
   เลือกสายในเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์ เมื่อ
   $\uparrow$(สายในเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์) $_{\text{เลือกสาย}}$ > $\uparrow$ (สายหลักของวงจร) $_{\text{เลือกสาย}}$
5. สำหรับแต่ละเกตออร์
   ถ้า มีการเลือกสายเอาต์พุต แล้ว ให้นำสายอินพุตออกจากการเลือก

รูปที่ 3.12 ขั้นตอนการเลือกสายเมื่อไม่พิจารณาผลของความแปรปรวนความหน่วง สำหรับส่วนวงจรรางคู่ที่ออกแบบโดยใช้แผนภาพตัดสินใจแบบทวิภาคชนิดมีการลดทอนอันดับ

จากวิธีการเลือกสายของส่วนวงจรรางคู่ทั้งการออกแบบโดยใช้ตรรกะรางคู่ที่ไร้ตัวผกผันและการออกแบบโดยใช้แผนภาพตัดสินใจแบบทวิภาคชนิดมีการลดทอนอันดับข้างต้น จะได้ว่า ไม่มีการเลือกคู่สายเอาต์พุตของส่วนวงจรรางคู่ เนื่องจากคู่สายดังกล่าวได้ต่อเป็นอินพุตของอุปกรณ์ชนิดซีซึ่งสามารถตรวจสอบการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณทั้ง 0⟶1 ในขั้นทำงาน และ 1⟶0 ในขั้นว่างได้

3.3.2.2 การเลือกสายเมื่อพิจารณาผลของความแปรปรวนความหน่วง

เมื่อพิจารณาผลของความแปรปรวนความหน่วง จะได้ว่า ค่าความหน่วงประมาณที่ใช้เปรียบเทียบในการเลือกสายมีความคลาดเคลื่อนจากค่าความหน่วงจริงของวงจรระดับเลย์เอาท์ เมื่อให้เกตและสายในวงจรรวมเรียกว่า ส่วนประกอบวงจร จะได้ว่าการเรียงต่อของเกต

และสายจะได้ เส้นทางต่อเชื่อมของส่วนประกอบวงจร และสามารถวิเคราะห์ผลของความแปรปรวนความหน่วงได้เป็น 2 **ส่วน คือ**

1. **ความแปรปรวนความหน่วงบนส่วนประกอบวงจร**

หมายถึง ความแปรปรวนความหน่วงบนแต่ละส่วนประกอบวงจรส่งผลกระทบต่อการทำงานของส่วนประกอบวงจรนั้นเท่านั้น โดยไม่ส่งผลกระทบต่อส่วนประกอบวงจรอื่นที่ต่อเป็นเอาต์พุตของส่วนประกอบวงจรนั้น

2. **ความแปรปรวนความหน่วงบนเส้นทางต่อเชื่อมของส่วนประกอบวงจร**

หมายถึง การรวมผลกระทบของความแปรปรวนความหน่วงที่แต่ละส่วนประกอบวงจรมีต่อการทำงานของส่วนประกอบวงจรอื่นที่อยู่บนเส้นทางต่อเชื่อมของส่วนประกอบวงจรเส้นทางเดียวกัน

จากการแบ่งวิเคราะห์ลักษณะการส่งผ่านระดับสัญญาณในส่วนวงจรรางคู่ให้เป็นกลุ่มของส่วนประกอบวงจรเพื่อการเลือกสายให้ครอบคลุมการเปลี่ยนระดับสัญญาณ กล่าวคือ ในการออกแบบโดยใช้ตรรกะรางคู่ที่ไร้ตัวผกผัน การเลือกสายมีจุดประสงค์เพื่อให้ครอบคลุมลักษณะการส่งผ่านระดับสัญญาณที่เป็นหนึ่งจากสองในแต่ละคู่เกตแอนด์ออร์ และในการออกแบบโดยใช้แผนภาพตัดสินใจแบบทวิภาคชนิดมีการลดทอนอันดับ การเลือกสายมีจุดประสงค์เพื่อให้ครอบคลุมลักษณะการส่งผ่านระดับสัญญาณที่เป็นหนึ่งจากทั้งหมดในกลุ่มเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์ในแต่ละเกตออร์ จะได้ว่า การประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณเมื่อพิจารณาความแปรปรวนความหน่วงบนส่วนประกอบวงจรจึงใช้การปรับแต่งค่าความหน่วงที่เปรียบเทียบในการเลือกสาย

จากแนวทางการออกแบบวงจรที่ไม่ไวต่อความหน่วงชนิดปรับมาตราส่วนได้ การออกแบบได้วิเคราะห์ให้แทนส่วนวงจรรางคู่และส่วนวงจรตอบรับด้วยเส้นทางส่งผ่านระดับสัญญาณ t1 และ t2 ตามลำดับ ดังนั้น การประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณในส่วนวงจรรางคู่เมื่อพิจารณาความแปรปรวนความหน่วงบนเส้นทางต่อเชื่อมของส่วนประกอบวงจร จึงใช้ค่าความหน่วงการเปลี่ยนระดับสัญญาณที่สัญญาณแสดงความบริบูรณ์ของส่วนวงจรตอบรับ ซึ่งจะเสนอในหัวข้อ 3.3.3

ในการเลือกสาย วิเคราะห์ความแปรปรวนความหน่วงบนส่วนประกอบวงจร ได้ดังนี้

ในแบบจำลองความหน่วงแบบไม่ไวต่อความหน่วงชนิดปรับมาตราส่วนได้ กำหนดให้อัตราส่วนความหน่วงสัมพัทธ์(R) ซึ่งแทนความคลาดเคลื่อนของการประมาณเมื่อเทียบระหว่างเส้นทางส่งผ่านระดับสัญญาณสองเส้นทางมีขอบเขตเป็น $1/K < R < K$ โดย K คือ อัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุด ดังนี้

กำหนดให้

$d_a(x)$ = ค่าความหน่วงจริงของส่วนประกอบวงจร x

$d_e(x)$ = ค่าความหน่วงประมาณของส่วนประกอบวงจร x

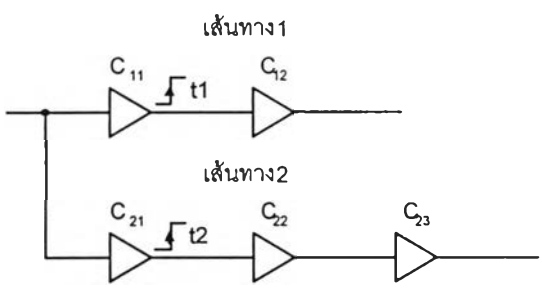
$D_a(x,y)$ = ค่าความหน่วงจริงสัมพัทธ์ระหว่างเส้นทางส่งผ่านระดับสัญญาณ x และ y

$D_e(x,y)$ = ค่าความหน่วงประมาณสัมพัทธ์ระหว่างเส้นทางส่งผ่านระดับสัญญาณ x และ y

R = อัตราส่วนความหน่วงสัมพัทธ์ระหว่างเส้นทางส่งผ่านระดับสัญญาณ x และ y

K = อัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุด

เมื่อจำลองส่วนประกอบวงจรในแต่ละเส้นทางต่อเชื่อมของส่วนประกอบวงจรดังแสดงในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 การจำลองส่วนประกอบวงจรในแต่ละเส้นทางต่อเชื่อมของส่วนประกอบวงจร

จากรูป จะได้ว่า เส้นทางต่อเชื่อมของส่วนประกอบวงจรมีลักษณะเทียบเท่าเส้นทางส่งผ่านระดับสัญญาณ ดังนั้น เมื่อกำหนดให้เส้นทางต่อเชื่อมของส่วนประกอบวงจร 1 มีการเปลี่ยนระดับสัญญาณก่อนเส้นทางต่อเชื่อมของส่วนประกอบวงจร 2 จากข้อกำหนดความหน่วงสามารถเขียนสมการค่าความหน่วงสัมพัทธ์ ได้ดังนี้

$$D_a\ (\text{เส้นทาง 1, เส้นทาง 2}) = \frac{d_a(C_{11}) + d_a(C_{12})}{d_a(C_{21}) + d_a(C_{22}) + d_a(C_{23})} \quad (3.14)$$

$$D_e\ (\text{เส้นทาง 1, เส้นทาง 2}) = \frac{d_e(C_{11}) + d_e(C_{12})}{d_e(C_{21}) + d_e(C_{22}) + d_e(C_{23})} \quad (3.15)$$

และจากข้อกำหนดในแบบจำลองความหน่วงแบบไม่ไวต่อความหน่วงชนิดปรับมาตราส่วนได้ มีสมการของอัตราส่วนความหน่วงสัมพัทธ์เป็น

$$R = \frac{D_a}{D_e} \quad (3.16)$$

$$\frac{1}{K} < R < K \quad (3.17)$$

เมื่อแทนอัตราส่วนความหน่วงสัมพัทธ์ในสมการที่ 3.17 โดยใช้สมการที่ 3.14 3.15 และ 3.16 จะได้

$$\frac{1}{K}\left\{\frac{d_e(C_{11}) + d_e(C_{12})}{d_e(C_{21})+d_e(C_{22})+d_e(C_{23})}\right\} < \frac{d_a(C_{11}) + d_a(C_{12})}{d_a(C_{21})+d_a(C_{22})+d_a(C_{23})} < K\left\{\frac{d_e(C_{11}) + d_e(C_{12})}{d_e(C_{21})+d_e(C_{22})+d_e(C_{23})}\right\} \quad (3.18)$$

จากสมการที่ได้ เมื่อนำค่า 1/K และค่า K คูณเข้ากับค่าความหน่วงประมาณของส่วนประกอบวงจรในเส้นทางต่อเชื่อมของส่วนประกอบวงจร 1 ดังนี้

$$\frac{\frac{1}{K} d_e(C_{11}) + \frac{1}{K} d_e(C_{12})}{d_e(C_{21})+d_e(C_{22})+d_e(C_{23})} < \frac{d_a(C_{11}) + d_a(C_{12})}{d_a(C_{21})+d_a(C_{22})+d_a(C_{23})} < \frac{K\, d_e(C_{11}) + K\, d_e(C_{12})}{d_e(C_{21})+d_e(C_{22})+d_e(C_{23})} \quad (3.19)$$

พบว่าสามารถแยกพิจารณาความแปรปรวนความหน่วงบนส่วนประกอบวงจร ได้ดังนี้

$$\frac{1}{K} d_e(C_{11}) < d_a(C_{11}) < K\, d_e(C_{11}) \quad (3.20)$$

$$\frac{1}{K} d_e(C_{12}) < d_a(C_{12}) < K\, d_e(C_{12}) \quad (3.21)$$

$$d_a(C_{21}) = d_e(C_{21}) \quad (3.22)$$

$$d_a(C_{22}) = d_e(C_{22}) \quad (3.23)$$

$$d_a(C_{23}) = d_e(C_{23}) \quad (3.24)$$

เมื่อพิจารณาค่าสัดส่วนระหว่าง ค่าความหน่วงจริงของส่วนประกอบวงจรที่อยู่ในเส้นทางต่อเชื่อมของส่วนประกอบวงจรที่กำหนดให้มีการเปลี่ยนระดับสัญญาณก่อน เช่น C_{11} กับค่าความหน่วงจริงของส่วนประกอบวงจรที่อยู่ในเส้นทางต่อเชื่อมของส่วนประกอบวงจรที่กำหนดให้มีการเปลี่ยนระดับสัญญาณหลัง เช่น C_{21} สามารถเขียนสมการความหน่วงได้เป็น

$$\frac{1}{K}\frac{d_e(C_{11})}{d_e(C_{21})} < \frac{d_a(C_{11})}{d_a(C_{21})} < K\frac{d_e(C_{11})}{d_e(C_{21})} \qquad (3.25)$$

จะได้ว่า สามารถพิจารณาค่าสัดส่วนความหน่วงสัมพัทธ์ระหว่างสองส่วนประกอบวงจรที่อยู่ต่างเส้นทางต่อเชื่อมของส่วนประกอบวงจรได้เช่นเดียวกับการพิจารณาค่าสัดส่วนความหน่วงสัมพัทธ์ระหว่างสองเส้นทางต่อเชื่อมของส่วนประกอบวงจร ดังนั้น การเปรียบเทียบค่าความหน่วงระหว่างส่วนประกอบวงจรในการเลือกสายเพื่อตรวจสอบการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณจึงสามารถใช้ข้อกำหนดความหน่วงระหว่างเส้นทางต่อเชื่อมของส่วนประกอบวงจรสองเส้นทางในการออกแบบวงจรระดับเกตได้ กล่าวคือ จากรูปที่ 3.13 ค่าความหน่วงการเปลี่ยนระดับสัญญาณ t2 ที่เอาต์พุตของส่วนประกอบวงจร C_{21} สามารถใช้ประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณ t1 ที่เอาต์พุตของส่วนประกอบวงจร C_{11} ได้เมื่อค่าความหน่วงของ t2 มากกว่าค่าความหน่วงของ t1 เป็น K เท่า และแบ่งการปรับแต่งการเลือกสายตามแนวทางการออกแบบส่วนวงจรรางคู่เป็น 2 แบบ ดังนี้

1. การออกแบบโดยใช้ตรรกะรางคู่ที่ไร้ตัวผกผัน

สามารถแบ่งการเปรียบเทียบค่าความหน่วง ได้ดังนี้

ก. สำหรับเกตแอนด์

จากลักษณะการจัดเรียงเกตในส่วนวงจรรางคู่ จะได้ว่า แต่ละอินพุตของเกตแอนด์จะเป็นอินพุตของวงจรหรือเอาต์พุตของคู่เกตก่อนหน้า ดังนั้น การเปรียบเทียบค่าความหน่วงที่แต่ละอินพุตของเกตแอนด์จึงเป็นการเปรียบเทียบค่าความหน่วงระหว่างส่วนประกอบวงจรที่อยู่ต่างเส้นทางต่อเชื่อมของส่วนประกอบวงจร ทำให้การประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณ 1⟶0 ที่ทุกสายอินพุตของเกตแอนด์โดยใช้ค่าความหน่วงการเปลี่ยนระดับสัญญาณ 1⟶0 ของสายอินพุตที่มีค่าความหน่วงสูงสุดต้องมีการปรับแต่งค่าความหน่วงโดยคำนึงถึงผลของความแปรปรวนความหน่วงบนส่วนประกอบวงจร และได้การเลือกสายดังแสดงในรูปที่ 3.14

เลือกสายที่มี $\lceil L_{\text{สูงสุด}}$ (สายอินพุตของเกตแอนด์)
และ เลือกสายที่มี
$\lceil L$ (สายอินพุตของเกตแอนด์) > $\dfrac{\lceil L_{\text{สูงสุด}} \text{ (สายอินพุตของเกตแอนด์)}}{K}$
โดยค่าความหน่วงของสายอินพุตของเกตแอนด์คิดที่จุดปลายของสาย

รูปที่ 3.14 การปรับแต่งค่าความหน่วงเมื่อพิจารณาระหว่างสายอินพุตของเกตแอนด์สำหรับแต่ละคู่เกตแอนด์ออร์

ข. สำหรับเกตออร์

จากการวิเคราะห์ใน 3.2 ส่วนวงจรรางคู่ประกอบด้วยวงจรย่อยสองส่วน คือ ส่วนที่ให้เอาต์พุต f และส่วนที่ให้เอาต์พุต f' โดยเกตแอนด์และเกตออร์ในแต่ละคู่เกตแอนด์ออร์จะเรียงแยกกันระหว่างสองส่วนนี้ ดังนั้น การเปรียบเทียบค่าความหน่วงที่แต่ละอินพุตของเกตแอนด์กับสายเอาต์พุตของเกตออร์จึงเป็นการเปรียบเทียบค่าความหน่วงระหว่างสองส่วนประกอบวงจรที่อยู่ต่างเส้นทางต่อเชื่อมของส่วนประกอบวงจร ทำให้การประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณ 1⟶0 ที่ทุกสายอินพุตของเกตแอนด์โดยใช้ค่าความหน่วงการเปลี่ยนระดับสัญญาณ 1⟶0 ของสายเอาต์พุตของเกตออร์ต้องมีการปรับแต่งค่าความหน่วงโดยคำนึงถึงผลของความแปรปรวนความหน่วงบนส่วนประกอบวงจร และได้การเลือกสายดังแสดงในรูปที่ 3.15

เลือกสายเอาต์พุตของเกตออร์ g'_L ที่ต่อเป็นอินพุตของเกตแอนด์ g_{L+1}
และ เลือกสายอินพุตของเกตแอนด์ เมื่อ
$\lceil L$ (สายอินพุตของเกตแอนด์) > $\dfrac{\lceil L \text{ (สายเอาต์พุตของเกตออร์) } \text{เลือกสาย}}{K}$
โดยค่าความหน่วงของสายอินพุตของเกตแอนด์คิดที่จุดปลายของสาย
และค่าความหน่วงของสายเอาต์พุตของเกตออร์คิดที่จุดต้นของสาย

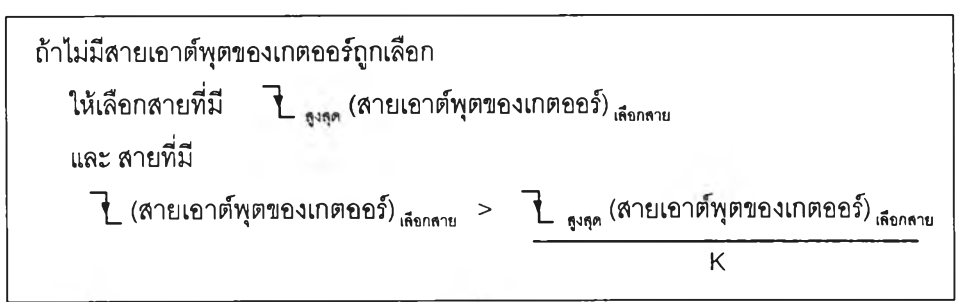
รูปที่ 3.15 การปรับแต่งค่าความหน่วงเมื่อพิจารณาระหว่างสายอินพุตของเกตแอนด์กับสายเอาต์พุตของเกตออร์สำหรับแต่ละคู่เกตแอนด์ออร์

สำหรับกลุ่มสายอินพุตของเกตออร์ พบว่า การประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณ 1⟶0 ได้ใช้ลักษณะการทำงานของเกตออร์และเลือกสายเอาต์พุต กล่าวคือ การเปลี่ยนระดับสัญญาณ 1⟶0 ที่สายเอาต์พุตของเกตออร์สามารถใช้แสดงการสิ้นสุดการ

เปลี่ยนระดับสัญญาณ 1→0 ที่ทุกอินพุตได้โดยไม่ต้องมีการเปรียบเทียบค่าความหน่วง ทำให้ความแปรปรวนความหน่วงบนส่วนประกอบวงจรที่ต่อเป็นอินพุตของเกตออร์ไม่ส่งผลต่อการประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณโดยใช้สายเอาต์พุตของเกตออร์ดังกล่าว ดังนั้นจึงไม่ต้องปรับแต่งการเลือกสาย

ค. สำหรับทั้งวงจร

ในกรณีที่ทั้งส่วนวงจรรางคู่ไม่มีการเลือกสายเอาต์พุตของเกตออร์ พบว่า การเปรียบเทียบค่าความหน่วงที่เอาต์พุตของทุกเกตออร์เพื่อเลือกสายที่มีค่าความหน่วงสูงสุดเป็นการเปรียบเทียบค่าความหน่วงระหว่างส่วนประกอบวงจรที่อยู่ ณ. จุดต่าง ๆ ในวงจร ดังนั้นจึงต้องมีการปรับแต่งค่าความหน่วงโดยคำนึงถึงผลของความแปรปรวนความหน่วงบนส่วนประกอบวงจร และได้วิธีการเลือกสายดังแสดงในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 การปรับแต่งค่าความหน่วงเมื่อพิจารณาระหว่างสายเอาต์พุตของเกตออร์สำหรับทั้งวงจร

สรุปขั้นตอนการเลือกสายเมื่อพิจารณาผลของความแปรปรวนความหน่วงได้ดังแสดงในรูปที่ 3.17

1. สำหรับแต่ละคู่เกตแอนด์ออร์ วิเคราะห์จากอินพุตของวงจรไปยังเอาต์พุต

   1.1 เลือกสายเอาต์พุตของเกตออร์ g'_L ที่ต่อเป็นอินพุตของเกตแอนด์ g_{L+1}

   1.2 เลือกสายอินพุตของเกตแอนด์ เมื่อ

   $$\text{ค่าความหน่วง (สายอินพุตของเกตแอนด์)} > \frac{\text{ค่าความหน่วง (สายเอาต์พุตของเกตออร์)}_{\text{เลือกสาย}}}{K}$$

   โดย ค่าความหน่วงของสายอินพุตของเกตแอนด์คิดที่จุดปลายของสาย

   และ ค่าความหน่วงของสายเอาต์พุตของเกตออร์คิดที่จุดต้นของสาย

   1.3 ถ้าไม่มีสายอินพุตของเกตแอนด์ถูกเลือก

   ให้เลือกสายที่มี ค่าความหน่วงสูงสุด (สายอินพุตของเกตแอนด์)

   และ สายที่มี

   $$\text{ค่าความหน่วง (สายอินพุตของเกตแอนด์)} > \frac{\text{ค่าความหน่วงสูงสุด (สายอินพุตของเกตแอนด์)}}{K}$$

2. ถ้าไม่มีสายเอาต์พุตของเกตออร์ถูกเลือก

   ให้เลือกสายที่มี ค่าความหน่วงสูงสุด (สายเอาต์พุตของเกตออร์)$_{\text{เลือกสาย}}$

   และ สายที่มี

   $$\text{ค่าความหน่วง (สายเอาต์พุตของเกตออร์)}_{\text{เลือกสาย}} > \frac{\text{ค่าความหน่วงสูงสุด (สายเอาต์พุตของเกตออร์)}_{\text{เลือกสาย}}}{K}$$

รูปที่ 3.17 ขั้นตอนการเลือกสายเมื่อพิจารณาผลของความแปรปรวนความหน่วง สำหรับส่วนวงจรรางคู่ที่ออกแบบโดยใช้ตรรกะรางคู่ที่ไร้ตัวผกผัน

2. การออกแบบโดยใช้แผนภาพตัดสินใจแบบทวิภาคชนิดมีการลดทอนอันดับ

สรุปผลของความแปรปรวนความหน่วงบนส่วนประกอบวงจรที่มีต่อการเลือกสาย ได้ดังนี้

ก. สายหลักของเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์

จากลักษณะการจัดเรียงเกตในวงจร จะได้ว่า การเปรียบเทียบค่าความหน่วงระหว่างแต่ละสายอินพุตของเกตแอนด์ในเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์เพื่อหาสายที่มีค่าความหน่วงการเปลี่ยนระดับสัญญาณ 1→0 สูงสุดหรือสายหลักของเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์ เป็นการเปรียบเทียบค่าความหน่วงระหว่างส่วนประกอบวงจรที่อยู่ต่างเส้นทางต่อเชื่อมของส่วนประกอบวงจร ทำให้ต้องคิดผลของความแปรปรวนความหน่วงบนส่วนประกอบวงจร

แต่เนื่องจากลักษณะการทำงานของส่วนวงจรรางคู่ที่การเปลี่ยนระดับสัญญาณที่เอาต์พุตเกิดจากการส่งผ่านระดับสัญญาณบนเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์ กล่าวคือ ในขั้นทำงานจะมีการเปลี่ยนระดับสัญญาณ 0⟶1 ส่งผ่านไปบนสายทุกเส้นในเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์เพียงหนึ่งเส้นทางและให้ค่ารหัสตรงรางคู่ที่เอาต์พุต และในขั้นว่างจะมีการเปลี่ยนระดับสัญญาณ 1⟶0 ส่งผ่านไปบนเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์นั้นและให้ค่าตัวแบ่งรอบการทำงานที่เอาต์พุต ทำให้ความแปรปรวนความหน่วงบนส่วนประกอบวงจรในเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์ไม่ส่งผลต่อการประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณโดยใช้สายหลักของเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์

ทั้งนี้เมื่อพิจารณารวมทั้งเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์พบว่า ความแปรปรวนความหน่วงบนส่วนประกอบวงจรมีผลต่อค่าความหน่วงการส่งผ่านระดับสัญญาณของเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์ ซึ่งผลดังกล่าวถือเป็นความแปรปรวนความหน่วงบนเส้นทางต่อเชื่อมของส่วนประกอบวงจร และการประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณใช้ค่าความหน่วงการเปลี่ยนระดับสัญญาณที่สัญญาณแสดงความบริบูรณ์ของส่วนวงจรตอบรับซึ่งจะเสนอในหัวข้อ 3.3.3

ข. สายหลักของการต่อเชื่อมเกตออร์

สายหลักของการต่อเชื่อมเกตออร์หาได้จากการเปรียบเทียบค่าความหน่วงโดยให้สายเอาต์พุตของเกตออร์เป็นส่วนหนึ่งของกลุ่มเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์ที่เป็นอินพุตของเกตออร์นั้น ดังนั้นจึงพิจารณาผลของความแปรปรวนความหน่วงบนส่วนประกอบวงจรได้เช่นเดียวกับสายหลักของเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์ กล่าวคือ ความแปรปรวนความหน่วงบนส่วนประกอบวงจรไม่ส่งผลต่อการประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณโดยใช้สายหลักของการต่อเชื่อมเกตออร์

ค. สายหลักของวงจร

จากลักษณะการจัดเรียงเกตในวงจร จะได้ว่า การเปรียบเทียบค่าความหน่วงระหว่างสายหลักของการต่อเชื่อมเกตออร์เพื่อหาสายที่มีค่าความหน่วงการเปลี่ยนระดับสัญญาณ 1⟶0 ต่ำสุดหรือสายหลักของวงจร เป็นการเปรียบเทียบค่าความหน่วงระหว่างส่วนประกอบวงจรที่อยู่ ณ.จุดต่าง ๆ ในวงจร ทำให้ต้องคำนึงถึงผลของความแปรปรวนความหน่วงบนส่วนประกอบวงจร และปรับแต่งค่าความหน่วงในการเลือกสาย

สรุปขั้นตอนการเลือกสายเมื่อพิจารณาผลของความแปรปรวนความหน่วงได้ดังแสดงในรูปที่ 3.18

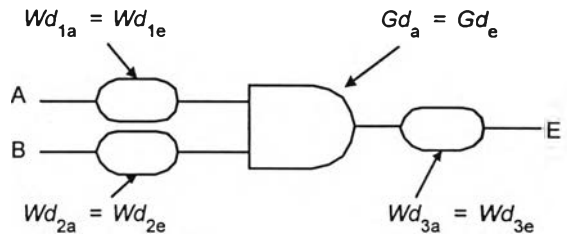
1. สำหรับแต่ละเกตออร์ วิเคราะห์จากอินพุตของวงจรไปยังเอาต์พุต
   1.1 สำหรับแต่ละเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์
   หา สายหลักของเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์ คือ สายที่ $\lceil_{\text{สูงสุด}}$ (สายในเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์) $_{\text{เลือกสาย}}$
   1.2 หา สายหลักของการต่อเชื่อมเกตออร์ คือ สายที่
   $\lceil_{\text{สูงสุด}}$ ($\lceil_{\text{ต่ำสุด}}$(สายหลักของเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์) $_{\text{เลือกสาย}}$,
   สายเอาต์พุตของเกตออร์) $_{\text{เลือกสาย}}$
   1.3 เลือก สายหลักของการต่อเชื่อมเกตออร์
   1.4 สำหรับแต่ละเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์
   เลือกสายในเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์ เมื่อ
   $\lceil$ (สายในเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์) $_{\text{เลือกสาย}}$ > $\lceil$ (สายหลักของการต่อเชื่อมเกตออร์) $_{\text{เลือกสาย}}$
2. หา สายหลักของวงจร คือ สายที่ $\lceil_{\text{ต่ำสุด}}$ (สายหลักของการต่อเชื่อมเกตออร์) $_{\text{เลือกสาย}}$
3. เลือก สายหลักของวงจร
4. สำหรับแต่ละเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์ในวงจร
   เลือกสายในเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์ เมื่อ
   $\lceil$(สายในเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์) $_{\text{เลือกสาย}}$ > $\dfrac{\lceil\text{(สายหลักของวงจร)}_{\text{เลือกสาย}}}{K}$
5. สำหรับแต่ละเกตออร์
   ถ้า มีการเลือกสายเอาต์พุต แล้ว ให้นำสายอินพุตออกจากการเลือก

รูปที่ 3.18 ขั้นตอนการเลือกสายเมื่อพิจารณาผลของความแปรปรวนความหน่วง สำหรับส่วนวงจรรางคู่ที่ออกแบบโดยใช้แผนภาพตัดสินใจแบบทวิภาคชนิดมีการลดทอนอันดับ

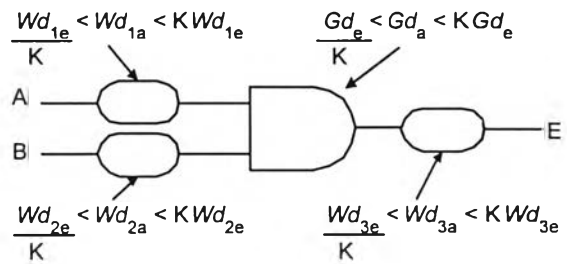
3.3.3 การคำนวณค่าความหน่วงการเปลี่ยนระดับสัญญาณของสัญญาณแสดงความบริบูรณ์

เมื่อส่วนวงจรตอบรับออกแบบโดยใช้เพียงเกตออร์ จะได้ว่า การประกันการสิ้นสุดของทุกการเปลี่ยนระดับสัญญาณ 0⟶1 ในขั้นทำงานของส่วนวงจรรางคู่สำหรับความแปรปรวนความหน่วงบนเส้นทางต่อเชื่อมของส่วนประกอบวงจรได้ใช้ค่าความหน่วงการเปลี่ยนระดับสัญญาณของสัญญาณแสดงความบริบูรณ์ และเมื่อการออกแบบมีการกำหนดอัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุด(K) พบว่า สามารถวิเคราะห์รวมผลกระทบของความแปรปรวน

ความหน่วงของทุกส่วนประกอบวงจรที่อยู่บนเส้นทางต่อเชื่อมของส่วนประกอบวงจรเดียวกัน ได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.19



ก. เมื่อไม่พิจารณาความแปรปรวนความหน่วงบนส่วนประกอบวงจร



ข. เมื่อพิจารณาความแปรปรวนความหน่วงบนส่วนประกอบวงจร

รูปที่ 3.19 ความแปรปรวนความหน่วงบนเส้นทางต่อเชื่อมของส่วนประกอบวงจร

จากรูปจะได้สมการสำหรับค่าความหน่วงเป็น

กำหนดให้

$d_a(x,y)$ = ค่าความหน่วงจริงของเส้นทางต่อเชื่อมของส่วนประกอบวงจรจากจุด x ไปยัง y

$d_e(x,y)$ = ค่าความหน่วงประมาณของเส้นทางต่อเชื่อมของส่วนประกอบวงจรจากจุด x ไปยัง y

เมื่อไม่พิจารณาความแปรปรวนความหน่วง สามารถคำนวณค่าความหน่วงจริงของเส้นทางต่อเชื่อมของส่วนประกอบวงจรจากจุด A ไปยัง E ได้ดังนี้

$$d_a(A,E) = Wd_{1a} + Gd_a + Wd_{3a} \quad (3.26)$$

เมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุด(K) สามารถคำนวณค่าความหน่วงจริงของเส้นทางต่อเชื่อมของส่วนประกอบวงจรจากจุด A ไปยัง E ได้ดังนี้

$$\frac{Wd_{1e}}{K} + \frac{Gd_e}{K} + \frac{Wd_{3e}}{K} < d_a(A,E) < K\,Wd_{1e} + K\,Gd_e + K\,Wd_{3e} \quad (3.27)$$

จากสมการที่ 3.26 และ 3.27 สรุปได้สมการสำหรับค่าความหน่วงเป็น

$$\frac{d_e(A,E)}{K} < d_a(A,E) < K\, d_e(A,E) \qquad (3.28)$$

จากสมการจะได้ว่า ความแปรปรวนความหน่วงบนเส้นทางต่อเชื่อมของส่วนประกอบวงจรสามารถคำนวณได้โดยวิธีเดียวกับการคำนวณความแปรปรวนความหน่วงบนส่วนประกอบวงจร และได้ว่า การประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณของทุกส่วนประกอบวงจรในเส้นทางต่อเชื่อมของส่วนประกอบวงจรจากจุด A ไปยัง E จะต้องใช้ค่าความหน่วงประมาณในการออกแบบวงจรระดับเกตมากกว่าค่าความหน่วงประมาณของเส้นทางต่อเชื่อมของส่วนประกอบวงจรจากจุด A ไปยัง E เป็น K เท่า

ดังนั้น เมื่อพิจารณาความแปรปรวนความหน่วงบนเส้นทางต่อเชื่อมของส่วนประกอบวงจรพบว่า การใช้ส่วนวงจรตอบรับในการประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณในส่วนวงจรรางคู่ต้องใช้การออกแบบให้ส่วนวงจรตอบรับมีค่าความหน่วงการเปลี่ยนระดับสัญญาณที่สัญญาณแสดงความบริบูรณ์ค่ามากกว่าค่าความหน่วงการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณของส่วนวงจรรางคู่เป็น K เท่า โดย ค่าความหน่วงการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณของส่วนวงจรรางคู่จะคำนวณจากค่าสูงสุดระหว่างค่าความหน่วงของเส้นทางต่อเชื่อมของส่วนประกอบวงจรจากทุกอินพุตไปยังเอาต์พุตของส่วนวงจรรางคู่และค่าความหน่วงของส่วนวงจรรางคู่ที่คำนวณจากสมการที่ 3.10 และ 3.11 ในหัวข้อ 3.3.1 ดังนี้

กำหนดให้

$d_e(DR)$ = ค่าความหน่วงประมาณในการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณของส่วนวงจรรางคู่

$d_e(ACK)$ = ค่าความหน่วงประมาณของการเปลี่ยนระดับสัญญาณที่สัญญาณแสดงความบริบูรณ์

เมื่อเอาต์พุตของส่วนวงจรรางคู่เป็น (f,f') จะได้ว่ามีเส้นทางต่อเชื่อมของส่วนประกอบวงจรสองเส้นทาง คือ เส้นทางต่อเชื่อมของส่วนประกอบวงจรไปยัง f และเส้นทางต่อเชื่อมของส่วนประกอบวงจรไปยัง f' จึงคำนวณค่าความหน่วงประมาณของส่วนวงจรรางคู่ ได้ดังนี้

$$d_e(DR)_{\text{ขั้นทำงาน}} = \text{ค่าสูงสุด}\,(\,d_e(\text{อินพุตของวงจร, f}),\, d_e(\text{อินพุตของวงจร, f'}),\, WKP) \qquad (3.29)$$

$$d_e(DR)_{\text{ขั้นว่าง}} = \text{ค่าสูงสุด}\,(\,d_e(\text{อินพุตของวงจร, f}),\, d_e(\text{อินพุตของวงจร, f'}),\, IDP) \qquad (3.30)$$

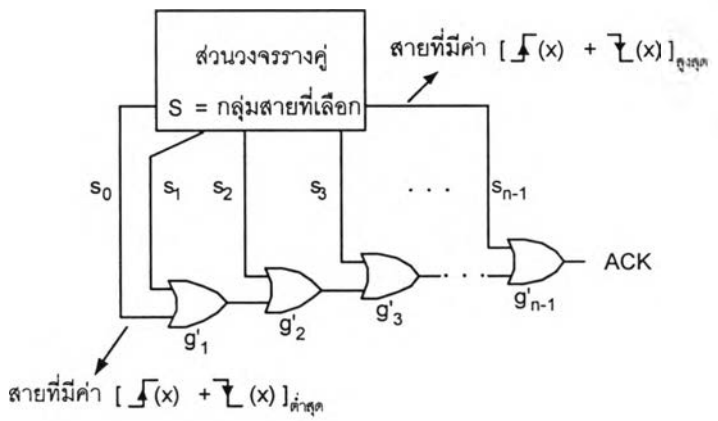
และคำนวณค่าความหน่วงของการเปลี่ยนระดับสัญญาณที่สัญญาณแสดงความบริบูรณ์ได้ดังนี้

$$d_e(ACK)_{\text{ขึ้นทำงาน}} = K\, d_e(DR)_{\text{ขึ้นทำงาน}} \quad (3.31)$$

$$d_e(ACK)_{\text{ขึ้นว่าง}} = K\, d_e(DR)_{\text{ขึ้นว่าง}} \quad (3.32)$$

3.3.4 การเรียงเกตออร์ในส่วนวงจรตอบรับ

จากวิธีการเลือกสายในหัวข้อ 3.3.2 พบว่า เมื่อเรียงสายที่เลือกจำนวน n สายจากผลรวมของค่าความหน่วงการเปลี่ยนระดับสัญญาณ 0⟶1 และค่าความหน่วงการเปลี่ยนระดับสัญญาณ 1⟶0 โดยเรียงจากน้อยไปมาก จะสามารถจัดเรียงเกตออร์ได้ดังแสดงในรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 การจัดเรียงเกตออร์ในส่วนวงจรตอบรับ

จากรูป สามารถคำนวณค่าความหน่วงของแต่ละเกตออร์ในการประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณในส่วนวงจรรางคู่โดยการแบ่งค่าความหน่วงการเปลี่ยนระดับสัญญาณที่สัญญาณแสดงความบริบูรณ์ซึ่งคำนวณโดยสมการที่ 3.31 และ 3.32 ดังแสดงในรูปที่ 3.21

1. ให้ $\int$ (เอาต์พุตของ g'_{n-1}) = $d_e(ACK)_{\text{ขั้นทำงาน}}$
   $\lceil$ (เอาต์พุตของ g'_{n-1}) = $d_e(ACK)_{\text{ขั้นว่าง}}$
2. จาก i เท่ากับ n – 1 ถึง 2
   2.1 $d_e(g'_i)$ = ค่าต่ำสุด ($\int$ (เอาต์พุตของ g'_i) - $\int$ (s_i) ,
   $\lceil$ (เอาต์พุตของ g'_i) - $\lceil$ (s_i))
   2.2 ให้ $\int$ (เอาต์พุตของ g'_{i-1}) = $\int$ (เอาต์พุตของ g'_i) - $d_e(g'_i)$
   $\lceil$ (เอาต์พุตของ g'_{i-1}) = $\lceil$ (เอาต์พุตของ g'_i) - $d_e(g'_i)$
3. $d_e(g'_1)$ = ค่าสูงสุด ($\int$ (เอาต์พุตของ g'_1) - $\int_{\text{ต่ำสุด}}$(อินพุตของ g'_1) ,
   $\lceil$ (เอาต์พุตของ g'_1) - $\lceil_{\text{สูงสุด}}$(อินพุตของ g'_1))

รูปที่ 3.21 การคำนวณค่าความหน่วงของแต่ละเกตออร์ในส่วนวงจรตอบรับ

3.4 การออกแบบส่วนวงจรตอบรับโดยใช้บัฟเฟอร์

เมื่อพิจารณาจากการวิเคราะห์ในหัวข้อ 3.2 ร่วมกับการทำงานของส่วนวงจรตอบรับที่ตรวจสอบการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณภายในส่วนวงจรรางคู่ในการทำงานรางคู่แบบสองขั้นชนิดกลับสู่ศูนย์ พบว่า ในขั้นทำงานสัญญาณแสดงความบริบูรณ์จะมีการเปลี่ยนระดับสัญญาณ 0→1 และในขั้นว่างสัญญาณแสดงความบริบูรณ์จะมีการเปลี่ยนระดับสัญญาณ 1→0 ซึ่งมีลักษณะตรงกับการเปลี่ยนระดับสัญญาณภายในส่วนวงจรรางคู่

ดังนั้นจึงสามารถออกแบบส่วนวงจรตอบรับ โดยให้สายอินพุตของส่วนวงจรตอบรับเป็นสายที่เลือกจากส่วนวงจรรางคู่และใช้ค่าความหน่วงการเปลี่ยนระดับสัญญาณที่สัญญาณแสดงความบริบูรณ์ในการประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณในส่วนวงจรรางคู่ทั้งในขั้นทำงานและในขั้นว่าง ทำให้การออกแบบส่วนวงจรตอบรับจึงใช้เพียงบัฟเฟอร์เพื่อให้การเปลี่ยนระดับสัญญาณที่สัญญาณแสดงความบริบูรณ์มีการทำงานสัมพันธ์กับการเปลี่ยนระดับสัญญาณภายในส่วนวงจรรางคู่ ดังนี้

<u>ขั้นทำงาน</u> สายที่เลือกจากส่วนวงจรรางคู่จะมีค่าระดับสัญญาณ 1 ทำให้ส่วนวงจรตอบรับให้สัญญาณแสดงความบริบูรณ์มีการเปลี่ยนระดับสัญญาณ 0→1 โดยมีค่าความหน่วงการเปลี่ยนระดับสัญญาณเป็น K เท่าของค่าความหน่วงการเปลี่ยนระดับสัญญาณสุดท้ายภายในส่วนวงจรรางคู่เพื่อให้วงจรเชิงผสมที่ได้มีความทนต่อความแปรปรวนความหน่วงที่อัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุด(K)

ขั้นว่าง สายที่เลือกจากส่วนวงจรรางคู่จะมีค่าระดับสัญญาณ 0 ทำให้ส่วนวงจรตอบรับให้สัญญาณแสดงความบริบูรณ์มีการเปลี่ยนระดับสัญญาณ 1⟶0 โดยมีค่าความหน่วงการเปลี่ยนระดับสัญญาณเป็น K เท่าของค่าความหน่วงการเปลี่ยนระดับสัญญาณสุดท้ายภายในส่วนวงจรรางคู่เพื่อให้วงจรเชิงผสมที่ได้มีความทนต่อความแปรปรวนความหน่วงที่อัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุด

การออกแบบส่วนวงจรตอบรับจึงแบ่งการวิเคราะห์ได้เป็นสองขั้นตอน คือ การวิเคราะห์ลักษณะการทำงานของเกตในส่วนวงจรรางคู่เพื่อการเลือกสายและการเรียงบัฟเฟอร์ในส่วนวงจรตอบรับให้ได้ค่าความหน่วงการเปลี่ยนระดับสัญญาณที่สัญญาณแสดงความบริบูรณ์ตามต้องการ

3.4.1 การวิเคราะห์ลักษณะการทำงานของเกตในส่วนวงจรรางคู่เพื่อการเลือกสาย

เมื่อส่วนวงจรตอบรับออกแบบโดยใช้บัฟเฟอร์ พบว่า ลักษณะการทำงานของบัฟเฟอร์ไม่สามารถใช้ค่าระดับสัญญาณที่เอาต์พุตในการประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณที่อินพุตได้ ดังนั้นการประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณทั้งในขั้นทำงานและในขั้นว่างจึงต้องใช้ค่าความหน่วงการเปลี่ยนระดับสัญญาณที่สัญญาณแสดงความบริบูรณ์เท่านั้น การเลือกสายจากส่วนวงจรรางคู่สำหรับเป็นสายอินพุตของส่วนวงจรตอบรับจึงมีจุดประสงค์เพื่อให้ได้กลุ่มสายที่มีการเปลี่ยนระดับสัญญาณ 0⟶1 ในขั้นทำงานและ 1⟶0 ในขั้นว่างในทุกแบบอินพุต โดยการประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณเมื่อพิจารณาผลความแปรปรวนความหน่วงจะใช้ค่าความหน่วงการเปลี่ยนระดับสัญญาณที่สัญญาณแสดงความบริบูรณ์ ซึ่งจะเสนอในหัวข้อ 3.4.2

ในการเลือกสายจากส่วนวงจรรางคู่สามารถแบ่งสายได้เป็นสองกลุ่ม คือ กลุ่มสายที่เป็นสายอินพุตและสายภายในส่วนวงจรรางคู่ และสายคู่เอาต์พุตของส่วนวงจรรางคู่ สำหรับกลุ่มสายที่เป็นสายอินพุตและสายภายในส่วนวงจรรางคู่สามารถแบ่งการเลือกสายตามแนวทางการออกแบบส่วนวงจรรางคู่ได้เป็น 2 แบบ คือ

1. การออกแบบโดยใช้ตรรกะรางคู่ที่ไร้ตัวผกผัน

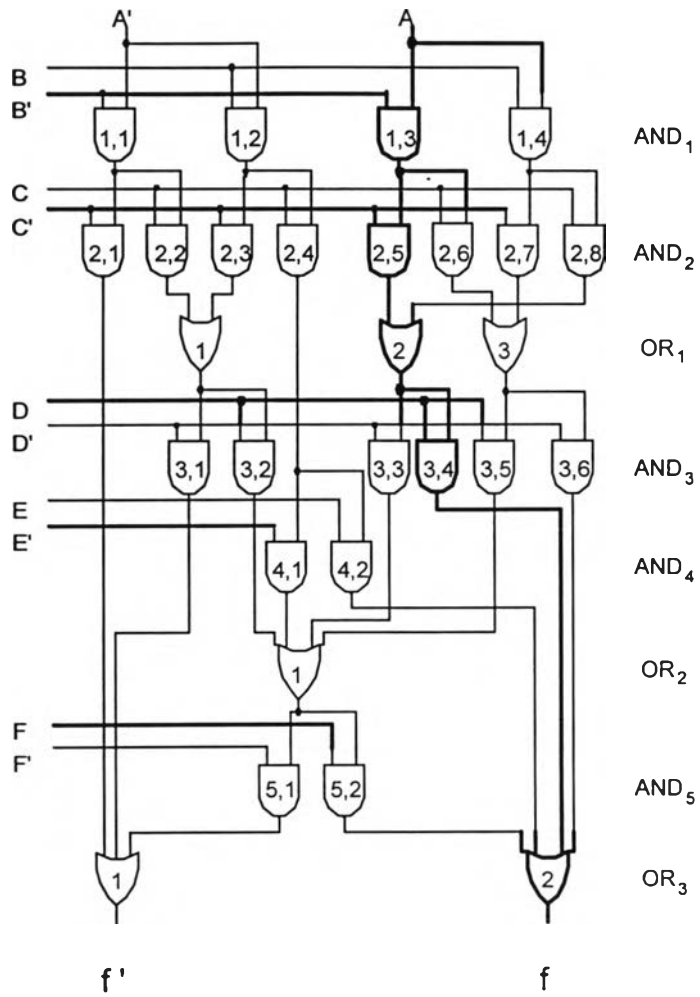
จากการวิเคราะห์ในหัวข้อ 3.2 จะได้ว่า การเปลี่ยนระดับสัญญาณที่เอาต์พุตของทุกคู่เกตแอนด์ออร์มีลักษณะเป็นหนึ่งจากสอง คือ ในขั้นทำงานทุกคู่เกตแอนออร์จะมีสายเอาต์พุตหนึ่งเส้นมีค่าระดับสัญญาณ 1 และในขั้นว่างทุกคู่เกตแอนออร์จะมีสายเอาต์พุตทั้งสองเส้นมีค่าระดับสัญญาณ 0 ดังนั้นการเลือกคู่สายเอาต์พุตของคู่เกตแอนด์ออร์เพียงคู่เดียวสำหรับเป็นอินพุตของบัฟเฟอร์จึงเพียงพอในการครอบคลุมทั้งการเปลี่ยนระดับสัญญาณ 0→1 ในขั้นทำงานและการเปลี่ยนระดับสัญญาณ 1→0 ในขั้นว่าง

เมื่อพิจารณาค่าความหน่วงการเปลี่ยนระดับสัญญาณของทุกคู่สายเอาต์พุตของคู่เกตแอนด์ออร์ร่วมกับลักษณะการประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณของบัฟเฟอร์ซึ่งใช้ค่าความหน่วงการเปลี่ยนระดับสัญญาณที่สัญญาณแสดงความบริบูรณ์ จะได้ว่า การเลือกสายจากส่วนวงจรรางคู่จะต้องเลือกคู่สายเอาต์พุตของคู่เกตแอนด์ออร์ที่สายหนึ่งเส้นมีผลรวมของค่าความหน่วงการเปลี่ยนระดับสัญญาณต่ำสุด โดยการคำนวณค่าความหน่วงจะใช้ค่าความหน่วงที่ต่ำสุด คือ สมการที่ 3.12 ในหัวข้อ 3.3.2.1

เมื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าความหน่วงของทุกคู่สายอินพุตและทุกคู่สายเอาต์พุตของคู่เกตแอนด์ออร์ภายในส่วนวงจรรางคู่ โดยพิจารณาจากลักษณะของสมการคำนวณค่าความหน่วงที่ใช้ พบว่า คู่สายที่สายหนึ่งเส้นมีผลรวมค่าความหน่วงการเปลี่ยนระดับสัญญาณค่าต่ำสุดเป็นคู่สายคู่หนึ่งในคู่สายอินพุตของส่วนวงจรรางคู่เท่านั้น ดังนั้นจึงสรุปการเลือกสายจากกลุ่มสายที่เป็นสายอินพุตและสายภายในส่วนวงจรรางคู่ได้เป็น การเลือกคู่สายอินพุตของส่วนวงจรรางคู่ที่สายหนึ่งเส้นมีผลรวมค่าความหน่วงการเปลี่ยนระดับสัญญาณต่ำสุด

2. การออกแบบโดยใช้แผนภาพตัดสินใจแบบทวิภาคชนิดมีการลดทอนอันดับ

จากการวิเคราะห์ในหัวข้อ 3.2 จะได้ว่า การเปลี่ยนระดับสัญญาณที่กลุ่มเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์ที่เป็นอินพุตของแต่ละเกตออร์มีลักษณะเป็นหนึ่งจากทั้งหมด และเมื่อนำตัวอย่างส่วนวงจรรางคู่ในรูปที่ 3.9 มาจำลองการทำงานโดยให้แบบอินพุต ABCDEF เท่ากับ 100101 ดังแสดงในรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 การจำลองการทำงานของส่วนวงจรรางคู่
สำหรับแบบอินพุต ABCDEF = 100101

จากรูป จะได้ว่า การเลือกสายเอาต์พุตของเกตออร์จะสามารถครอบคลุมการเปลี่ยนระดับสัญญาณที่มีลักษณะเป็นหนึ่งจากทั้งหมดของกลุ่มเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์ที่เป็นอินพุตของแต่ละเกตออร์นั้นได้ ดังนั้น เพื่อให้การเลือกสายสามารถครอบคลุมการเปลี่ยนระดับสัญญาณที่มีลักษณะเป็นหนึ่งจากทั้งหมดของทั้งส่วนวงจรรางคู่ การเลือกสายจึงเลือกกลุ่มสายเอาต์พุตของกลุ่มเกตออร์ที่แปลงจากบัพภายในบัพเดียวกันร่วมกับสายในเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์ที่ขนานกับสายเอาต์พุตของกลุ่มเกตออร์นั้น เช่น จากรูปตัวอย่างจะเลือกสายเอาต์พุต(OR_{11}) เอาต์พุต(OR_{12}) และเอาต์พุต(OR_{13}) ร่วมกับเอาต์พุต(AND_{21}) สำหรับเป็นอินพุตของบัฟเฟอร์

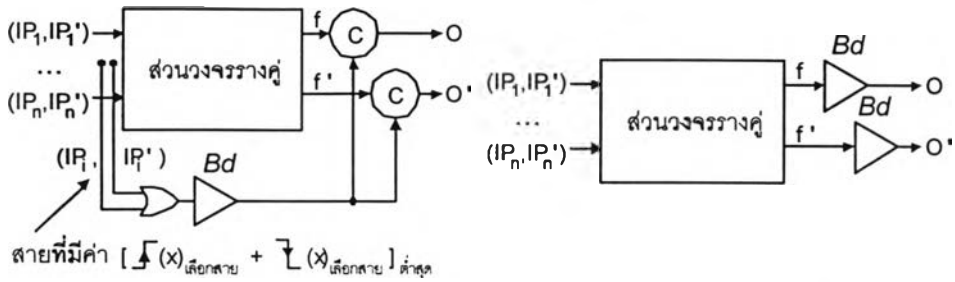
เมื่อพิจารณาค่าความหน่วงการเปลี่ยนระดับสัญญาณของกลุ่มสายที่เลือก ร่วมกับลักษณะการประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณของบัฟเฟอร์ซึ่งใช้ค่าความหน่วงการเปลี่ยนระดับสัญญาณที่สัญญาณแสดงความบริบูรณ์ จะได้ว่า การเลือกสายจากส่วนวงจรรางคู่จะต้องเลือกกลุ่มสายที่สายหนึ่งเส้นมีผลรวมค่าความหน่วงการเปลี่ยนระดับสัญญาณต่ำสุด โดยการคำนวณค่าความหน่วงจะใช้ค่าความหน่วงที่ต่ำสุด คือ สมการที่ 3.12 ในหัวข้อ 3.3.2.1

เมื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าความหน่วงของทุกกลุ่มสายที่ใช้การเลือกสายข้างต้นกับค่าความหน่วงของทุกคู่สายอินพุตของส่วนวงจรรางคู่ โดยพิจารณาจากลักษณะของสมการคำนวณค่าความหน่วงที่ใช้ พบว่า การเลือกสายในแต่ละแบบจะต้องเลือกสายอย่างน้อยสองเส้น และได้ว่า กลุ่มสายที่สายหนึ่งเส้นมีผลรวมค่าความหน่วงการเปลี่ยนระดับสัญญาณต่ำสุดเป็นคู่สายคู่หนึ่งในคู่สายอินพุตของส่วนวงจรรางคู่เท่านั้น ดังนั้นจึงสรุปการเลือกสายจากกลุ่มสายที่เป็นสายอินพุตและสายภายในส่วนวงจรรางคู่ได้เป็น การเลือกคู่สายอินพุตของส่วนวงจรรางคู่ที่สายหนึ่งเส้นมีผลรวมค่าความหน่วงการเปลี่ยนระดับสัญญาณต่ำสุด

สรุปได้ว่า การเลือกสายในแนวทางการออกแบบส่วนวงจรรางคู่ทั้งสองแบบเหมือนกัน คือ เมื่อพิจารณาเลือกสายจากกลุ่มสายที่เป็นสายอินพุตและสายภายในส่วนวงจรรางคู่ การเลือกสายจะเลือกคู่สายอินพุตของส่วนวงจรรางคู่ที่สายหนึ่งเส้นมีผลรวมค่าความหน่วงการเปลี่ยนระดับสัญญาณต่ำสุด และเมื่อพิจารณาสายคู่เอาต์พุตของส่วนวงจรรางคู่ การเลือกสายจะเลือกคู่สายเอาต์พุตของส่วนวงจรรางคู่นั้น

3.4.2 การเรียงบัฟเฟอร์ในส่วนวงจรตอบรับ

จากวิธีการเลือกสายในหัวข้อ 3.4.1 จะได้ว่า การเลือกสายแบ่งเป็นสองแบบ คือ การเลือกคู่สายอินพุตของส่วนวงจรรางคู่ที่สายหนึ่งเส้นมีผลรวมค่าความหน่วงการเปลี่ยนระดับสัญญาณต่ำสุด และการเลือกคู่สายเอาต์พุตของส่วนวงจรรางคู่ ดังนั้น ส่วนวงจรตอบรับจึงสามารถต่อบัฟเฟอร์เชื่อมกับส่วนวงจรรางคู่ได้เป็นสองแบบ คือ การต่อบัฟเฟอร์ขนานกับส่วนวงจรรางคู่และการต่อบัฟเฟอร์ที่เอาต์พุตของส่วนวงจรรางคู่ ดังแสดงในรูปที่ 3.23



ก. การต่อบัฟเฟอร์ขนานกับส่วนวงจรรางคู่

ข. การต่อบัฟเฟอร์ที่เอาต์พุตของส่วนวงจรรางคู่

รูปที่ 3.23 วงจรเชิงผสมแบบอสมวารที่ไม่ไวต่อความหน่วงชนิดปรับมาตราส่วนได้ซึ่งส่วนวงจรตอบรับออกแบบโดยใช้บัฟเฟอร์

เมื่อการออกแบบมีการกำหนดอัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุด(K) สามารถคำนวณค่าความหน่วงของบัฟเฟอร์ (*Bd*) สำหรับใช้ในการประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณในส่วนวงจรรางคู่ ได้ดังนี้

สำหรับการต่อบัฟเฟอร์ขนานกับส่วนวงจรรางคู่

$$Bd_{\text{บัฟเฟอร์ขนาน}} = K(\lceil, \lfloor)_{\text{สูงสุด}} \text{ (ทุกจุดยกเว้น f และ f')} \quad (3.33)$$

สำหรับการต่อบัฟเฟอร์ที่เอาต์พุตของส่วนวงจรรางคู่

$$Bd_{\text{บัฟเฟอร์ที่เอาต์พุต}} = K(\lceil, \lfloor)_{\text{สูงสุด}} \text{ (ทุกจุดยกเว้น f และ f')} - (\lceil, \lfloor)_{\text{ต่ำสุด}} \text{ (f,f')} \quad (3.34)$$

สรุป

การออกแบบวงจรเชิงผสมแบบอสมวารที่ไม่ไวต่อความหน่วงชนิดปรับมาตราส่วนได้ให้มีคุณสมบัติไม่มีฮาซาร์ด จะมีการแบ่งวงจรเป็นสองส่วน คือ ส่วนวงจรรางคู่ทำงานฟังก์ชันตรรกะ และส่วนวงจรตอบรับทำหน้าที่ตรวจสอบการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณในส่วนวงจรรางคู่และสร้างการเปลี่ยนระดับสัญญาณที่สัญญาณแสดงความบริบูรณ์เพื่อแสดงการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณในส่วนวงจรรางคู่

เมื่อกำหนดให้การออกแบบวงจรระดับเกตยอมให้ความคลาดเคลื่อนของค่าความหน่วงที่ใช้มีค่าไม่เกินอัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุด(K) จะได้ว่า การเปลี่ยนระดับสัญญาณที่สัญญาณแสดงความบริบูรณ์จะสามารถใช้ประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยน

ระดับสัญญาณในส่วนวงจรรางคู่ได้เมื่อสัญญาณแสดงความบริบูรณ์มีค่าความหน่วงการเปลี่ยนระดับสัญญาณมากกว่าค่าความหน่วงการสิ้นสุดทุกการเปลี่ยนระดับสัญญาณในส่วนวงจรรางคู่เป็น K เท่า

ด้วยข้อกำหนดความหน่วงของแบบจำลองความหน่วงแบบไม่ไวต่อความหน่วงชนิดปรับมาตราส่วนได้ซึ่งจัดเป็นแบบจำลองความหน่วงแบบหนึ่งในกลุ่มแบบจำลองความหน่วงชนิดไม่มีขอบเขต การออกแบบส่วนวงจรรางคู่จึงมีสองแนวทาง คือ การออกแบบโดยใช้ตรรกะรางคู่ที่ไร้ตัวผกผันและการออกแบบโดยใช้แผนภาพตัดสินใจแบบทวิภาคชนิดมีการลดทอนอันดับ และการออกแบบส่วนวงจรตอบรับที่ไร้อุปกรณ์ชนิดซีมีสองแนวทาง คือ การออกแบบส่วนวงจรตอบรับโดยใช้เกตออร์และการออกแบบส่วนวงจรตอบรับโดยใช้บัฟเฟอร์

จากการวิเคราะห์ลักษณะการส่งผ่านระดับสัญญาณในส่วนวงจรรางคู่ ในการทำงานรางคู่แบบสองขั้นชนิดกลับสู่ศูนย์ พบว่า เมื่อสิ้นสุดขั้นทำงานส่วนวงจรรางคู่จะมีทั้งสายที่มีค่าระดับสัญญาณ 1 และสายที่มีค่าระดับสัญญาณ 0 แต่เมื่อสิ้นสุดขั้นว่างสายทุกเส้นจะต้องมีค่าระดับสัญญาณ 0 ทำให้เมื่อพิจารณาร่วมกับลักษณะการทำงานของเกตออร์ที่ค่าระดับสัญญาณ 0 ที่เอาต์พุตของเกตออร์สามารถใช้ประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณที่ทุกอินพุตของเกตออร์จะได้ว่า การออกแบบส่วนวงจรตอบรับโดยใช้เกตออร์จึงใช้ค่าความหน่วงการเปลี่ยนระดับสัญญาณที่สัญญาณแสดงความบริบูรณ์ในการประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณในขั้นทำงาน และใช้การเลือกกลุ่มสายที่สามารถครอบคลุมการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณจากส่วนวงจรรางคู่ให้เป็นสายอินพุตของส่วนวงจรตอบรับเพื่อประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณในขั้นว่าง

ในการเลือกสายขั้นต้นที่ไม่พิจารณาผลของความแปรปรวนความหน่วง พบว่า ในการออกแบบโดยใช้ตรรกะรางคู่ที่ไร้ตัวผกผัน การเลือกสายจากส่วนวงจรรางคู่จะวิเคราะห์ที่แต่ละคู่เกตแอนด์ออร์เพื่อครอบคลุมการส่งผ่านระดับสัญญาณซึ่งมีลักษณะเป็นหนึ่งจากสอง แต่สำหรับการออกแบบโดยใช้แผนภาพตัดสินใจแบบทวิภาคชนิดมีการลดทอนอันดับ การเลือกสายจะวิเคราะห์ที่แต่ละเกตออร์ซึ่งมีอินพุตเป็นกลุ่มเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์เพื่อครอบคลุมการส่งผ่านระดับสัญญาณซึ่งมีลักษณะเป็นหนึ่งจากทั้งหมด

เมื่อพิจารณาผลของความแปรปรวนความหน่วงโดยให้ส่วนประกอบวงจรแทนเกตและสายในวงจร พบว่า สามารถพิจารณาค่าสัดส่วนความหน่วงสัมพัทธ์ระหว่างสองส่วนประกอบวงจรที่อยู่ต่างเส้นทางต่อเชื่อมของส่วนประกอบวงจรได้เช่นเดียวกับการพิจารณาค่าสัดส่วนความหน่วงสัมพัทธ์ระหว่างสองเส้นทางส่งผ่านระดับสัญญาณในวงจร กล่าวคือ ค่าความหน่วงการเปลี่ยนระดับสัญญาณ t2 ที่เอาต์พุตของส่วนประกอบวงจร C2 จะสามารถใช้ประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณ t1 ที่เอาต์พุตของส่วนประกอบวงจร C1 ได้เมื่อค่าความหน่วงของ t2 มากกว่าค่าความหน่วงของ t1 เป็น K เท่า ทำให้การเลือกสายต้องพิจารณาผลของความแปรปรวนความหน่วงโดยใช้การปรับแต่งค่าความหน่วงที่ใช้เปรียบเทียบในการเลือกสาย

เมื่อพิจารณารวมผลของความแปรปรวนความหน่วงบนส่วนประกอบวงจรเป็นความแปรปรวนความหน่วงบนเส้นทางต่อเชื่อมของส่วนประกอบวงจร พบว่าสามารถออกแบบให้วงจรมีความทนต่อความแปรปรวนความหน่วง โดยใช้การจัดเรียงเกตออร์ให้ส่วนวงจรตอบรับมีค่าความหน่วงการเปลี่ยนระดับสัญญาณที่สัญญาณแสดงความบริบูรณ์มากกว่าค่าความหน่วงการสิ้นสุดทุกการเปลี่ยนระดับสัญญาณในส่วนวงจรรางคู่เป็น K เท่า

สำหรับการออกแบบส่วนวงจรตอบรับโดยใช้บัฟเฟอร์ พบว่า ด้วยลักษณะการทำงานของบัฟเฟอร์ทำให้ไม่สามารถใช้ค่าระดับสัญญาณที่เอาต์พุตในการประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณที่อินพุตได้ ดังนั้น การประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณทั้งในขั้นทำงานและในขั้นว่างจึงต้องใช้ค่าความหน่วงการเปลี่ยนระดับสัญญาณที่สัญญาณแสดงความบริบูรณ์ โดยให้สายอินพุตของส่วนวงจรตอบรับได้จากการเลือกสายจากส่วนวงจรรางคู่ที่สามารถให้สัญญาณแสดงความบริบูรณ์มีการเปลี่ยนระดับสัญญาณทั้งในขั้นทำงานและในขั้นว่าง

จากการวิเคราะห์เพื่อการเลือกสาย พบว่าสามารถต่อบัฟเฟอร์เชื่อมกับส่วนวงจรรางคู่เป็นสองแบบ คือ การต่อบัฟเฟอร์ขนานกับส่วนวงจรรางคู่โดยเลือกคู่สายอินพุตของส่วนวงจรรางคู่ที่สายหนึ่งเส้นมีผลรวมค่าความหน่วงการเปลี่ยนระดับสัญญาณต่ำสุด และการต่อบัฟเฟอร์ที่เอาต์พุตของส่วนวงจรรางคู่ ทั้งนี้ในการต่อทั้งสองแบบจะใช้ค่าความหน่วงของบัฟเฟอร์ในการออกแบบให้การเปลี่ยนระดับสัญญาณที่สัญญาณแสดงความบริบูรณ์มีค่าความหน่วงมากกว่าค่าความหน่วงการสิ้นสุดทุกการเปลี่ยนระดับสัญญาณในส่วนวงจรรางคู่เป็น K เท่า