หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

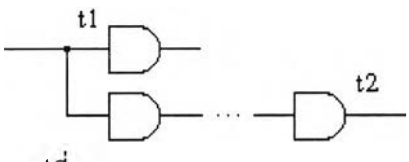
2.1 โมเดลความหน่วงวงจร (Circuit Delay Model)

โมเดลความหน่วงวงจรจะช่วยจำลองปัญหาการออกแบบ โดยกำหนดความเบี่ยงเบนของความหน่วงเกตและสายสัญญาณในวงจรเพื่อระบุคุณสมบัติวงจรระดับกายภาพ (Physical/Layout Level) ในกระบวนการผลิต (Fabrication Process) ต่อไป ในที่นี้จะกล่าวถึงเพียงโมเดลที่เกี่ยวข้องดังนี้

1. โมเดลที่ไม่ไวต่อความหน่วง แสดงไว้ดังรูปที่ 2.1 ตามทฤษฎีแล้วโมเดลนี้จะไม่มีการกำหนดความหน่วงของเกตและสายสัญญาณ แต่ความหน่วงของเกตและสายสัญญาณจะถือว่ามีอยู่แต่ไม่ทราบค่า ทำให้การออกแบบในส่วนตอบรับของวงจรมีความยุ่งยากและซับซ้อนมาก การออกแบบระดับกายภาพจะทำได้ง่ายแต่วงจรที่ได้จะมีขนาดใหญ่ไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้งานจริง

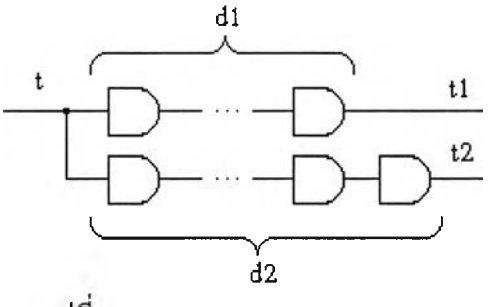
รูปที่ 2.1 Delay-Insensitive

2. โมเดลที่ไม่ไวต่อความหน่วงชนิดเสมือน แสดงไว้ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งก็คือโมเดลที่ไม่ไวต่อความหน่วงที่เพิ่มเติมคุณสมบัติ Isochronic Fork เข้าไป หมายความว่าสาย Fanout ทุกเส้นถือว่ามีความหน่วงเกิดขึ้นเท่ากัน ความหน่วงในส่วนที่เป็น Non-Isochronic Fork ถือว่ารวมเข้าเป็นความหน่วงเกต ทำให้ไม่จำเป็นต้องตรวจสอบสัญญาณในทุกสาย Fanout อีกต่อไป ซึ่งเป็นการช่วยลดภาระในการออกแบบวงจรได้



รูปที่ 2.2 Quasi-Delay-Insensitive

3. โมเดลที่ไม่ไวต่อความหน่วงชนิดปรับมาตราส่วนได้ แสดงไว้ดังรูปที่ 2.3 คือโมเดลที่ไม่ไวต่อความหน่วงชนิดเสมือนที่มีการกำหนดค่าความแปรปรวนความหน่วงสูงสุดหรือค่า K แล้วออกแบบวงจรตอบรับให้มีความหน่วงเป็นไปตามค่า K สามารถออกแบบวงจรรางคู่และวงจรตอบรับให้ทำงานควบคู่กันไปได้ เป็นการลดขนาดและความซับซ้อนของวงจรลง เพราะไม่จำเป็นต้องมีการตรวจสอบสัญญาณทุกเส้น แม้ว่าโมเดลที่ไม่ไวต่อความหน่วงชนิดเสมือนจะสามารถลดภาระการตรวจสอบสัญญาณไปได้บ้างแล้วก็ตามเพราะว่าไม่ต้องไปตรวจสอบสาย Fanout ทุกเส้น แต่ก็ยังมีการตรวจสอบเผื่อความผิดพลาดไว้มากเกินความจำเป็นอยู่ดี ทำให้วงจรในส่วนตอบรับยังมีขนาดใหญ่ แต่โมเดลที่ไม่ไวต่อความหน่วงชนิดปรับมาตราส่วนได้นี้ใช้ค่า K เป็นตัวกำหนดการออกแบบวงจรตอบรับ ทำให้ไม่ต้องเผื่อการตรวจสอบไว้มากเหมือนกับโมเดลที่ไม่ไวต่อความหน่วงชนิดเสมือน



รูปที่ 2.3 Scalable-Delay-Insensitive

จากรูปที่ 2.3 d_1 คือค่าความหน่วงของการเปลี่ยนระดับสัญญาณ (Transition) t_1 และ d_2 คือค่าความหน่วงของการเปลี่ยนระดับสัญญาณ t_2 หากพิจารณาดูแล้วการเกิดความหน่วงที่เป็นมาตราส่วนกันอย่างในอุดมคตินั้นแทบจะเป็นไปไม่ได้เลย กล่าวคือถ้าการเปลี่ยนระดับสัญญาณ t_1 แปรผันไป 50% มากกว่าเดิมที่ประมาณไว้ แล้วการเปลี่ยนระดับสัญญาณ t_2 ก็แปรผันไป 50% มากกว่าเดิมที่ประมาณไว้เช่นเดียวกัน นั่นหมายความว่าการเปลี่ยนระดับสัญญาณแปรผันไปเท่ากัน เป็นไปอย่างในอุดมคติวงจรที่ได้ก็จะทำงานได้ตามที่ออกแบบไว้ ซึ่งในความเป็นจริงแล้วไม่มีทางที่ความหน่วงของการเปลี่ยนระดับสัญญาณจะเป็นมาตราส่วนกันเช่นนั้นได้ ความหน่วงจะไม่เพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างเท่าๆ กันเช่นนั้น สิ่งที่เกิดขึ้นจริงคือถ้าระดับการเปลี่ยนสัญญาณ t_1 แปรผันไปมากกว่าเดิม 50% ความหน่วงของการเปลี่ยนระดับสัญญาณ t_2 อาจแปรผันไปมากกว่าเดิม 60% หรือ 40% หรือเป็นอย่างอื่นก็ได้ ดังนั้นแล้วโมเดลที่ไม่ไวต่อความหน่วงชนิดปรับมาตราส่วนได้นี้จึงเกิดขึ้นมาอยู่ภายใต้เงื่อนไขที่ว่า “ความหน่วง

สามารถแปรผันไปเท่าใดก็ได้แต่จะแปรผันไปโดยใกล้เคียงกัน" ซึ่งก็หมายความว่าถึงแม้ว่าความหน่วงของการเปลี่ยนระดับสัญญาณ t_1 จะแปรผันไปจากเดิมมาก แต่ถ้าความหน่วงของการเปลี่ยนระดับสัญญาณ t_2 แปรผันไปจากเดิมมากโดยใกล้เคียงกับ t_1 ก็จะสามารถรับประกันได้ว่าวงจรจะทำงานได้อย่างถูกต้องเช่นเดิม [9] ถ้าให้ D_a แทนค่าความหน่วงจริงสัมพัทธ์ (Actual Relative Delay) ให้ D_e แทนค่าความหน่วงประมาณสัมพัทธ์ (Estimated Relative Delay) ให้ R แทนค่าอัตราส่วนความหน่วงสัมพัทธ์ (Relative Delay Ratio) ซึ่ง R หมายถึงอัตราส่วนระหว่าง D_a และ D_e และให้ V แทนค่าอัตราส่วนระหว่าง R ของ t_1 กับ t_2 ซึ่งค่า V นั้นมีขอบเขตอยู่ภายในค่า K หรือค่าอัตราส่วนความแปรปรวนสูงสุด (Maximum Delay Variation Ratio) ดังนี้

$$R_1 = D_{1a} / D_{1e}$$

$$R_2 = D_{2a} / D_{2e}$$

$$V = R_2 / R_1$$

$$(1 / K) < V < K$$

$$(1 / K) < (D_{2a} / D_{1a}) \times (D_{1e} / D_{2e}) < K$$

จากสมการข้างต้น ถ้าเอาค่า K คูณตลอดจะได้ผลเป็นดังต่อไปนี้

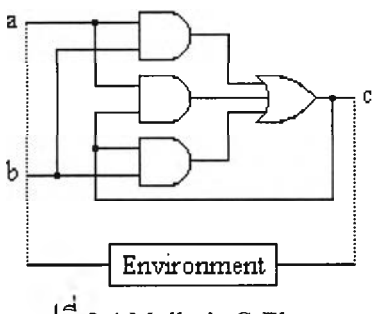
$$1 < (D_{2a} / D_{1a}) \times (K \times D_{1e} / D_{2e}) < K^2$$

ถ้าค่า $(K \times D_{1e})$ มีค่าน้อยกว่า D_{2e} หมายความว่าค่าความหน่วงประมาณ D_{2e} มีค่ามากกว่าค่า D_{1e} อย่างน้อย K เท่า ซึ่งจะส่งผลให้พจน์ $(K \times D_{1e} / D_{2e})$ มีค่าน้อยกว่า 0 เพราะฉะนั้นสมการข้างต้นเป็นจริงก็ต่อเมื่อพจน์ (D_{2a} / D_{1a}) มีค่ามากกว่าศูนย์เท่านั้น จึงจะทำให้พจน์ $(D_{2a} / D_{1a}) \times (K \times D_{1e} / D_{2e})$ มีค่ามากกว่า 1 และทำให้สมการเป็นจริงได้ ดังนั้นถ้าประมาณไว้ว่า D_{2e} มีค่ามากกว่าค่า D_{1e} อย่างน้อย K เท่า ก็จะรับประกันได้ว่าความหน่วงจริงของ t_2 มากกว่าความหน่วงจริงของ t_1 เมื่อความหน่วงจริงแปรผันไปจากความหน่วงประมาณไม่เกิน K เท่า

สังเกตว่าค่าความหน่วงจริงนั้นเป็นสิ่งที่ไม่ทราบค่า แต่ทราบว่ามีค่าอยู่และทราบว่าการเปลี่ยนระดับสัญญาณที่ 1 นั้นจะเสร็จสิ้นก่อนการเปลี่ยนระดับสัญญาณที่ 2 ดังนั้นโดยทฤษฎีแล้วถ้าสามารถกำหนดให้ค่าความหน่วงประมาณของการเปลี่ยนระดับสัญญาณที่ 2 ให้มีค่ามากกว่าการเปลี่ยนระดับสัญญาณที่ 1 อย่างน้อย K เท่าได้ ก็จะสามารถรับประกันได้ว่าการเปลี่ยนระดับสัญญาณที่ 1 จะเสร็จสิ้นก่อนการเปลี่ยนระดับสัญญาณที่ 2 แน่นอน แต่ถ้าประมาณค่าความหน่วงของการเปลี่ยนระดับสัญญาณที่ 2 มากจนเกินไปก็จะไม่เป็นไปตามทฤษฎีนี้ เพราะจะส่งผลให้พจน์ $(D_{2a} / D_{1a}) \times (K \times D_{1e} / D_{2e})$ มีค่าไม่มากกว่า 1 ได้ และจะทำให้ต้องสร้างวงจรตอบรับมากเกินความจำเป็นอีกด้วย

2.2 อุปกรณ์ชนิดซี (C-Element)

อุปกรณ์ชนิดซี [9] เป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องใช้ในการตรวจสอบการสิ้นสุดของการเปลี่ยนระดับสัญญาณ เอาท์พุตของอุปกรณ์ชนิดซีจะเป็น 0 เมื่อทุกอินพุตเป็น 0 และเอาพุตจะเป็น 1 เมื่อทุกอินพุตเป็น 1 ส่วนกรณีอื่นๆ นั้นค่าเอาท์พุตของอุปกรณ์ชนิดซีจะมีค่าเดิมที่เป็นอยู่ก่อนหน้า อุปกรณ์ชนิดซีที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นแบบของ Muller ดังที่แสดงในรูปที่ 2.4

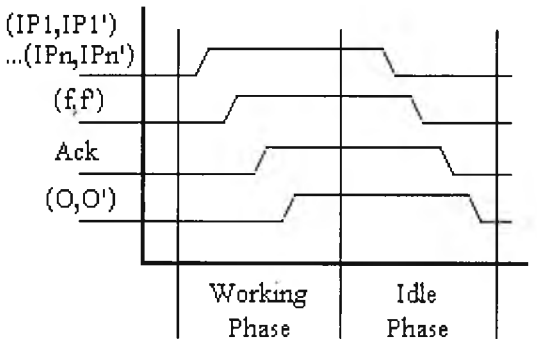


รูปที่ 2.4 Muller's C-Element

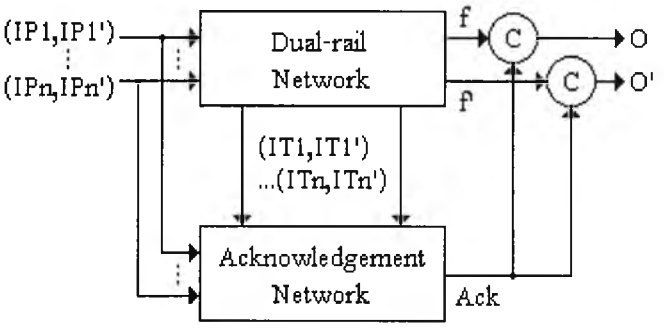
2.3 วงจรเชิงผสมแบบอสมวาร (Asynchronous Combination Logic)

การออกแบบวงจรเชิงผสมแบบอสมวารนิยมใช้รหัสรางคู่ (Dual-Rail Codeword / 2-Rail Codeword) เพราะมีคุณสมบัติ Self-Synchronizing คือสามารถใช้ส่งค่าระดับสัญญาณเพื่อแบ่งรอบการทำงานได้ ถ้าให้สัญญาณใดๆ ในวงจรสมวารแทนด้วย x เมื่อออกแบบเป็นวงจรรางคู่แล้วจะต้องเพิ่มนิเสธ (Negate) ของ x ไปด้วยนั่นคือ x' เรียกว่าเป็นรหัสรางคู่ เขียนแทนด้วย (x,x') โดยที่ในขั้นทำงานจะมีค่าเป็น (0,1) หรือ (1,0) แต่ในขั้นว่างจะมีค่า (0,0) เรียกว่าเป็น Non-codeword ซึ่ง

ถือว่าเป็นตัวแบ่งรอบการทำงาน (Spacer) ทำให้สามารถแบ่งรอบการทำงานเป็นรอบๆ ได้ โดยจะแบ่งเป็นขั้นทำงาน (Working Phase) และขั้นว่าง (Idle Phase) จะทำงานเป็นลักษณะเช่นนี้สลับกันไปในทุกๆ ขั้นตอนการทำงาน เรียกการทำงานในลักษณะนี้ว่า 2-Rail 2-Phase (Return-To-Zero) Operation ดังรูปที่ 2.5 และ รูปที่ 2.6 รหัสรางคู่จะไม่มีทางเป็นค่า (1,1) ได้ในการทำงานปกติ



รูปที่ 2.5 การทำงานแบบ 2-Rail 2-Phase (Return-To-Zero) Operation



รูปที่ 2.6 วงจรเชิงผสมแบบอสมวาร

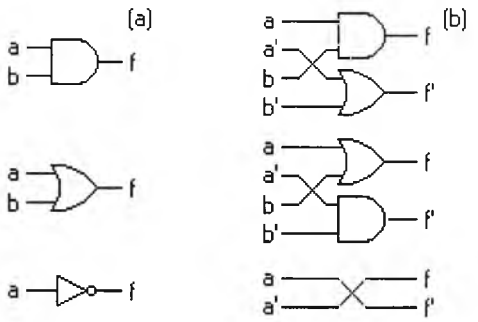
ในขั้นทำงานส่วนวงจรรางคู่จะได้รับอินพุต (IP_1,IP_1'), ..., (IP_n,IP_n') ทำให้คู่สายภายใน (IT_1,IT_1'), ..., (IT_m,IT_m') มีการเปลี่ยนระดับสัญญาณจาก 0 เป็น 1 และให้เอาท์พุตตามฟังก์ชันที่ออกแบบไว้ หลังจากนั้นเมื่อการเปลี่ยนระดับสัญญาณสิ้นสุดแล้ว วงจรส่วนตอบรับซึ่งทำหน้าที่ตรวจสอบการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณในส่วนวงจรรางคู่ก็จะให้สัญญาณตอบรับ (Completion Signal หรือ Acknowledgement Signal) ไปที่อุปกรณ์ชนิดซีเพื่อให้ค่าเอาท์พุต (O,O') ของวงจรออกมา

ในขั้นว่างส่วนวงจรรางคู่จะได้รับอินพุตเป็นตัวแบ่งรอบการทำงาน ซึ่งก็คือค่า (0,0) ทำให้ทุกสายที่มีค่าระดับสัญญาณ 1 จะเปลี่ยนเป็นระดับสัญญาณ 0 และวงจรตอบรับจะเปลี่ยนค่าระดับสัญญาณเป็น 0 ด้วย เมื่อวงจรตอบรับส่งค่าไปที่อุปกรณ์ชนิดซีก็จะได้ค่าเอาท์พุตบอกการสิ้นสุดรอบการทำงานและรอการทำงานในรอบถัดไป

จากลักษณะการทำงานดังกล่าวนี้ จะเห็นได้ว่ามีเพียงการเปลี่ยนระดับสัญญาณจาก 0 เป็น 1 ในขั้นทำงาน และมีเพียงการเปลี่ยนระดับสัญญาณจาก 1 เป็น 0 ในขั้นว่างเท่านั้น จะไม่มีการเปลี่ยนระดับสัญญาณจาก 1 เป็น 0 ในขั้นทำงาน และจะไม่มีการเปลี่ยนระดับสัญญาณจาก 0 เป็น 1 ในขั้นว่างเลย คุณสมบัตินี้เรียกว่า การเปลี่ยนระดับสัญญาณทางเดียว (Monotonic Change) ซึ่งสามารถรับประกันได้ว่าวงจรจะไม่เกิดฮาซาร์ด (Hazard) เลย [11]

2.4 การออกแบบวงจรรางคู่ โดยใช้ตรรกะรางคู่ไร้ตัวผกผัน (Inverter-Free 2-Rail Logic Implementation)

การออกแบบด้วยวิธีการใช้ตรรกะรางคู่ไร้ตัวผกผันนี้ มีข้อดีคือสามารถทำได้ง่ายและรวดเร็ว โดยใช้เพียงแค่ Duality ของเกตเท่านั้น ดังจะเห็นได้จากการเปรียบเทียบเกตต่างๆ ในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 (a) เกตของวงจรสมวารโดยทั่วไป (b) เกตที่เป็นตรรกะรางคู่ไร้ตัวผกผันวงจรอสมวาร

การออกแบบวิธีนี้ ผู้ที่ออกแบบวงจรสมวารมาเพียงแค่ปรับเปลี่ยนวงจรที่ถูกออกแบบไว้เล็กน้อยเท่านั้น คือใช้เพียง Duality ของเกตดังที่ได้แสดงไป ก็จะสามารถปรับเปลี่ยนให้เป็นวงจรแบบอสมวารได้แล้ว แต่วงจรที่ออกแบบด้วยวิธีนี้มีข้อเสีย คือจะใช้เกตจำนวนมากกว่าวิธีการออกแบบโดยใช้แผนภาพตัดสินใจแบบทวิภาคชนิดมีการลดทอนอันดับ

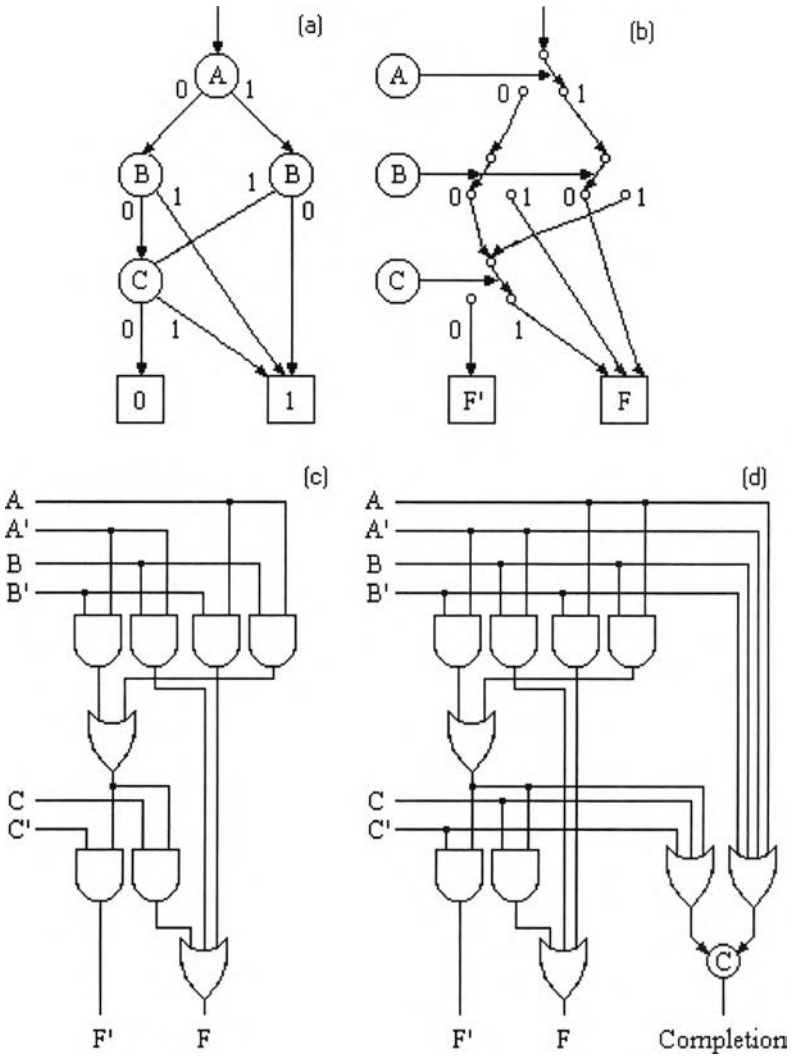
2.5 การออกแบบวงจรรางคู่โดยใช้แผนภาพตัดสินใจแบบทวิภาคชนิดมีการลดทอนอันดับ (Reduced-Ordered-Binary Decision Diagram (ROBDD) Implementation)

การออกแบบด้วยวิธีการใช้แผนภาพตัดสินใจแบบทวิภาคชนิดมีการลดทอนอันดับนี้ จะใช้เกตจำนวนน้อยกว่าวิธีการออกแบบโดยใช้ตรรกะรางคู่ไร้ตัวผกผัน จะเริ่มจากสร้างตารางค่าความจริงของฟังก์ชันตรรกะ จากนั้นก็เขียนโครงสร้างต้นไม้แล้วลดทอนอันดับลง แล้วจึงออกแบบวงจรจากโครงสร้างที่ได้หลังจากลดทอนอันดับแล้ว ตัวอย่างเช่น ฟังก์ชันตรรกะ F = AB' + A'B + C ซึ่งมีค่าความจริงเป็นดังตารางที่ 2.1 ดังนี้

A	B	C	F
0	0	0	0
0	0	1	1
0	1	0	1
0	1	1	1
1	0	0	1
1	0	1	1
1	1	0	0
1	1	1	1

ตารางที่ 2.1 ตารางค่าความจริงของฟังก์ชัน F = AB' + A'B + C

จากตารางที่ 2.1 ก็นำมาลดทอนอันดับลงโดยนำแถวที่มีค่าเหมือนกันมารวมกันซึ่งจะทำให้สามารถตัดบางโหนด (Node) ที่ซ้ำกันออกไปได้ จากนั้นจะได้ผลสุดท้ายเป็นดังรูปที่ 2.8 (a) ซึ่งเป็น ROBDD สุดท้ายหลังจากตัดโหนดที่ซ้ำกันออกแล้ว เมื่อดูตามรูปที่ 2.8 (b) ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบกับรูปที่ 2.8 (a) จะพบว่ามีลักษณะคล้ายสวิตช์ที่สามารถใช้ปรับเลือกเส้นทางได้ จากนั้นก็จะสามารถออกแบบวงจรอสมวารได้ดังรูปที่ 2.8 (c) รูปที่ 2.8 (d) เป็นวงจรอสมวารที่มีส่วนตอบรับที่ออกแบบด้วยโมเดลที่ไม่ไวต่อความหน่วงชนิดเสมือน

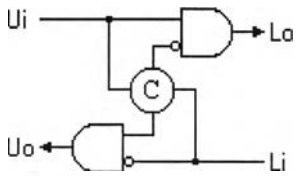


รูปที่ 2.8 ตัวอย่างการออกแบบวงจรอสมวารด้วย ROBDD

ถ้าสังเกตจากรูปที่ 2.8 (b) จะพบว่าวงจรที่ออกแบบด้วยวิธี ROBDD นั้นมีลักษณะคล้ายการทำงานของสวิตช์เปิดปิด กล่าวคือเมื่อถึงขั้นทำงานสวิตช์เหล่านี้จะให้สัญญาณวิ่งจากต้นทางถึงปลายทางเพียงเส้นเดียวเท่านั้น ซึ่งจะส่งผลให้ค่า F หรือ F' เพียงหนึ่งตัวเปลี่ยนค่าจาก 0 เป็น 1 ดังนั้นในวงจรส่วนตอบรับของโมเดลที่ไม่ไวต่อความหน่วงชนิดเสมือน ก็เพียงแต่ออกแบบให้ตรวจสอบการมาถึงของสัญญาณในแต่ละระดับขั้นของเกตเท่านั้น ดังที่ได้แสดงไว้อย่างชัดเจนในรูปที่ 2.8 (d)

2.6 อุปกรณ์ชนิดคิว (Q Element)

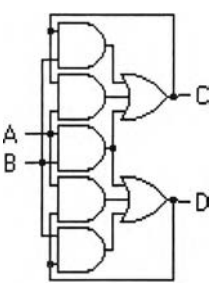
อุปกรณ์ชนิดคิว [11] เป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องใช้ในการออกแบบวงจรส่วนควบคุม เพื่อการควบคุมจังหวะในการทำงานและการตอบรับ อุปกรณ์ชนิดคิวมีลักษณะดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 Martin's Q Element

พิจารณาการทำงานของอุปกรณ์ชนิดคิวโดยเริ่มจากการให้ค่า 0 ทางด้านอินพุต คือ Ui และ Li ก่อน ซึ่งจะส่งผลให้อุปกรณ์ชนิดคิวให้ค่าเอาท์พุต คือ Uo และ Lo เป็น 0 เมื่อมีสัญญาณให้เริ่มทำงานโดยส่งมาทาง Ui เป็นค่า 1 ก็จะส่งผลให้ Lo ให้ค่า 1 ออกมา วงจรก็จะเริ่มเข้าสู่ขั้นทำงานจนส่งสัญญาณตอบรับเป็นค่า 1 กลับมาทาง Li ส่งผลให้ค่า Lo กลับเป็น 0 ทันที และจะทำให้วงจรเริ่มเข้าสู่ขั้นว่างอีกครั้ง เมื่อวงจรเข้าสู่ขั้นว่างจะส่งสัญญาณ 0 กลับมาที่ Li อีกครั้ง คราวนี้จะส่งผลให้ Uo มีค่าเป็น 1 ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการควบคุมให้ส่วนขั้นตอนต่อไปให้เริ่มทำงานได้

สังเกตว่าอุปกรณ์ชนิดซีที่ใช้งานอยู่ภายในอุปกรณ์ชนิดคิวนั้นเป็นแบบ 2 อินพุต 2 เอาท์พุต ดังนั้นจึงต้องมีการออกแบบอุปกรณ์ชนิดซีแบบพิเศษนี้ใหม่ตามรูปที่ 2.10 โดยการทำงานก็จะเป็นลักษณะเช่นเดียวกันกับอุปกรณ์ชนิดซีแบบเดิม



รูปที่ 2.10 อุปกรณ์ชนิดซีแบบ 2 อินพุต 2 เอาท์พุต