

บทที่ 5

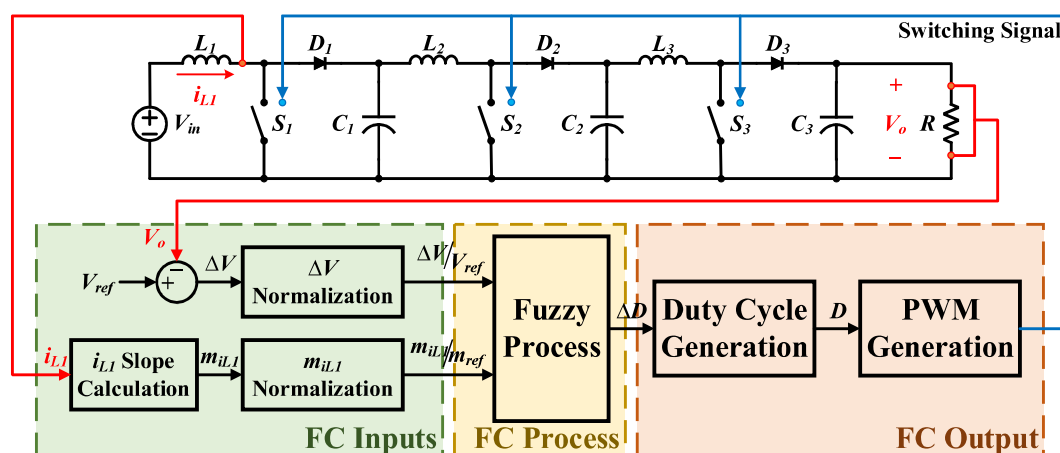
วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์เรียงต่อกันสามชั้นที่มีความคงทนต่อ ความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจร

5.1 บทนำ

จากการศึกษาค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์เรียงต่อกันสามชั้น ที่ได้นำเสนอไปในบทที่ 2 นั้น พบว่าวงจรดังกล่าวประกอบด้วยสวิตช์กำลังหลายตัว ในบทนี้จึงเป็นการศึกษาหาแนวทางการพัฒนางจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์เรียงต่อกันสามชั้น ให้มีความคงทนต่อความผิดพลาดเมื่อสวิตช์เปิดวงจร โดยศึกษาพฤติกรรมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์เรียงต่อกันสามชั้นทั้งในสภาวะปกติและมีความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรเกิดขึ้น ดำเนินการสังเกตค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุตัว รวมถึงสัญญาณของการควบคุมฟลักซ์ที่พัฒนาขึ้น ทั้งในสภาวะปกติ และสภาวะเกิดความผิดพลาด เพื่อนำมาสร้างเงื่อนไขในการตรวจจับความผิดพลาด ต่อมาเป็นการนำเสนอการระบุตำแหน่งความผิดพลาดที่เกิดขึ้นโดยสามารถระบุตำแหน่งความผิดพลาดที่เกิดขึ้นได้อย่างถูกต้อง และสุดท้ายเป็นการสร้างความคงทนต่อความผิดพลาด เพื่อให้วงจรยังคงสามารถทำงานต่อไปได้อย่างมีประสิทธิภาพภายใต้ความผิดพลาดที่เกิดขึ้น ซึ่งมีเนื้อหาดังต่อไปนี้

5.2 การศึกษาพฤติกรรมของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์เรียงต่อกันสามชั้น

การศึกษาพฤติกรรมของวงจรจะพิจารณาการทำงานของวงจรในโหมดการนำกระแสแบบต่อเนื่อง (Continuous conduction mode: CCM) ทั้งสภาวะปกติ และเมื่อเกิดความผิดพลาดในสภาวะการทำงานต่าง ๆ ภายใต้ตัวควบคุมฟลักซ์ที่พัฒนาขึ้น โดยใช้โครงสร้างดังรูปที่ 5.1 โดยจะอาศัยค่าพารามิเตอร์สำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าเรียงต่อกันสามชั้น และการควบคุมฟลักซ์ดังที่ได้ออกแบบไว้แล้วในบทที่ 3 และ 4 ตามลำดับ



รูปที่ 5.1 โครงสร้างการควบคุมฟัซซีที่พัฒนาขึ้นสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น

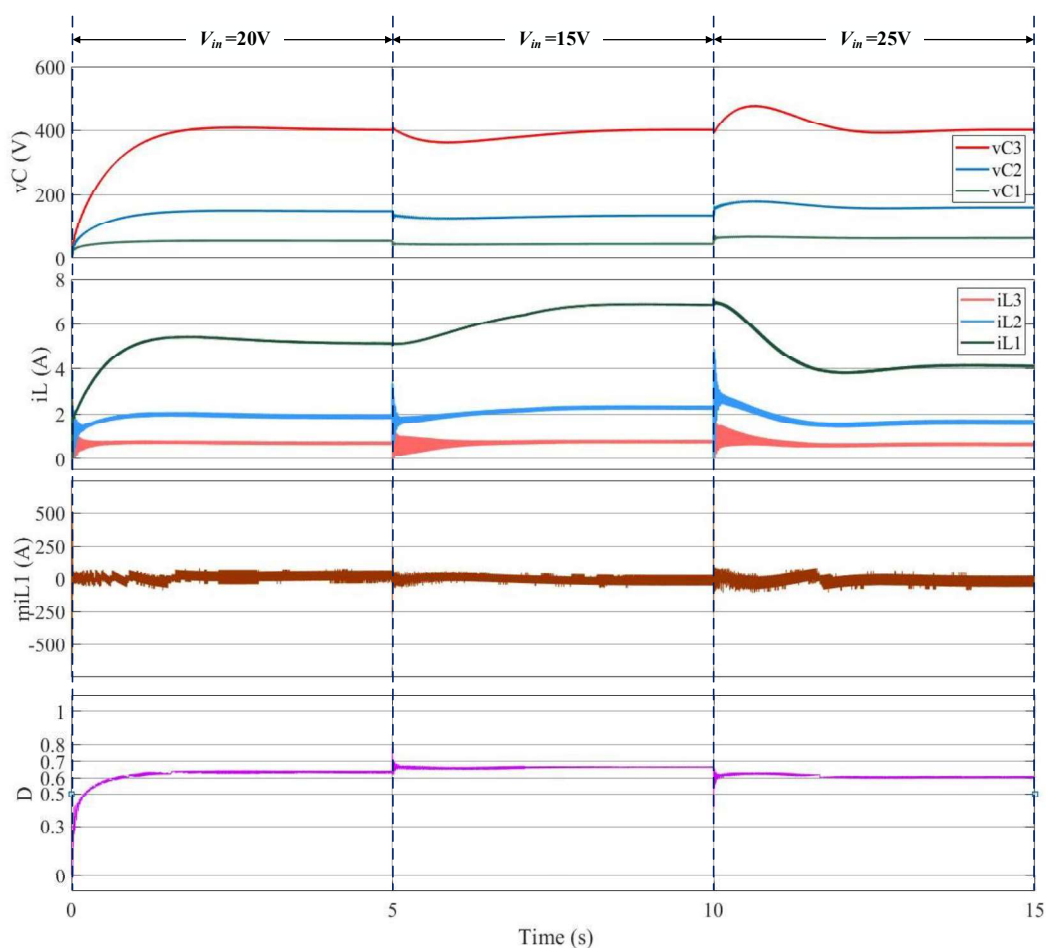
การสังเกตพฤติกรรมของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นภายใต้การควบคุมฟัซซีที่พัฒนาขึ้นทั้งในสภาวะปกติและเมื่อเกิดความผิดพลาด จะอาศัยการจำลองสถานการณ์ โดยสังเกตค่ากระแสอินพุต แรงดันเอาต์พุต และค่าวัฏจักรหน้าที่ของสวิตช์ที่ได้จากการควบคุมฟัซซีที่พัฒนาขึ้น เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาวิธีการตรวจจับความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจร และนำไปสู่การทำงานของวงจรที่มีความคงทนต่อความผิดพลาด ในการจำลองสถานการณ์จะแสดงแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ (V_{C1} , V_{C2} , V_{C3}) กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (i_{L1} , i_{L2} , i_{L3}) ความชันของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวแรก (m_{iL1}) และค่าวัฏจักรหน้าที่ของสวิตช์ (D) ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.2.1 การจำลองสถานการณ์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นในสภาวะปกติ

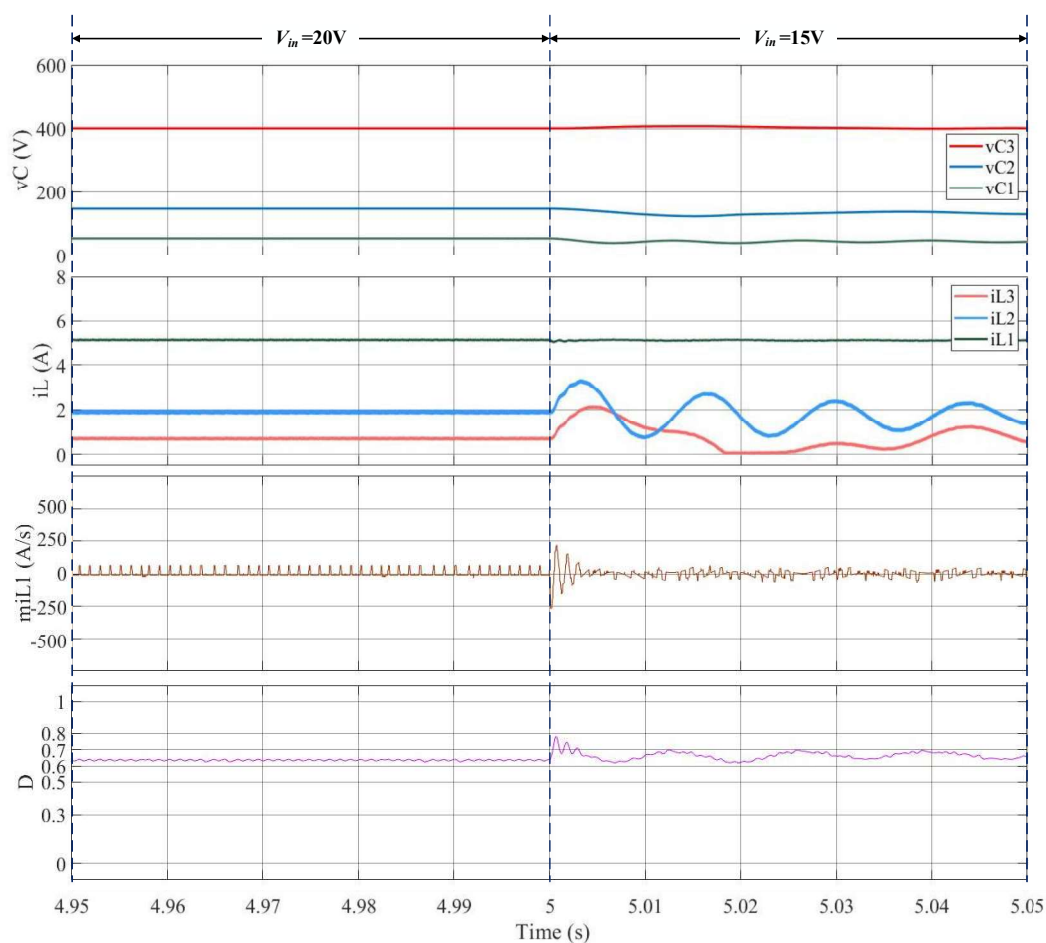
เพื่อพัฒนาวิธีการตรวจจับความผิดพลาดที่ทำงานได้อย่างถูกต้อง ได้ทำการสังเกตพฤติกรรมของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นภายใต้การควบคุมฟัซซีที่พัฒนาขึ้นจากการจำลองสถานการณ์ต่าง ๆ ของวงจรในขณะที่ทำงานปกติ โดยการเปลี่ยนจุดการทำงานของวงจร 3 กรณี ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต (V_{in}) การเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิง (V_{ref}) และการเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทาน (R) โดยพิจารณาการทำงานของวงจรในสภาวะชั่วคราว หลังจากการเปลี่ยนจุดการทำงานต่าง ๆ ของวงจร เนื่องจากในช่วงเวลาสั้น ๆ นี้ วงจรจะแสดงพฤติกรรมที่แตกต่างจากการทำงานของวงจรในสภาวะอยู่ตัวอย่างชัดเจน ซึ่งจะช่วยให้เข้าใจพฤติกรรมของวงจรมากขึ้น และนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ในการออกแบบวิธีการตรวจจับความผิดพลาดได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว

กรณีที่ 1 การจำลองสถานการณ์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง V_{in} เป็น 20V, 15V และ 25V ในช่วงเวลา 0s, 5s และ 10s ตามลำดับ โดยคงค่า V_{ref} ที่ 400V และ R ที่ 1600Ω จากผลการ

จำลองสถานการณ์รูปที่ 5.2 สังเกตเห็นได้ว่าแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ (v_{C1} , v_{C2} , v_{C3}) และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (i_{L1} , i_{L2} , i_{L3}) เกิดการพุ่งเกิน และลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อแรงดันอินพุตเพิ่มขึ้น และลดลงตามลำดับ หลังจากนั้น V_O จะถูกควบคุมให้เท่ากับ V_{ref} ที่ 400V เมื่อพิจารณา m_{iL1} พบว่าในช่วงเริ่มต้นการทำงานของวงจร m_{iL1} มีค่าของการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง $-100A/s$ ถึง $100A/s$ ส่วน D มีค่าเริ่มต้นจากศูนย์ เพิ่มขึ้น และคงที่ประมาณ 0.63 เพื่อให้ได้ V_O ที่ 400V ตาม V_{ref} โดยที่มี V_{in} เป็น 20V หลังจากนั้น ณ เวลาที่ 5s แรงดัน V_{in} ลดลงจาก 20V เป็น 15V จะเห็นได้ว่า v_{C3} มีค่าลดลง และถูกควบคุมให้มีค่าเท่ากับ V_{ref} ส่วน i_{L1} มีค่าเพิ่มขึ้นจากการควบคุมให้ m_{iL1} มีค่าใกล้เคียง m_{ref} โดยในสภาวะอยู่ตัว i_{L1} มีค่าประมาณ 6.67A เพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดเท่ากับ 100W สุดท้าย ณ เวลาที่ 10s แรงดัน V_{in} เพิ่มขึ้นจาก 15V เป็น 25V จะเห็นได้ว่า V_O มีการพุ่งเกิน หลังจากนั้นจะถูกควบคุมให้มีค่าเท่ากับ V_{ref} ส่วน i_{L1} มีค่าลดลงจาก 6.67A เป็น 4A เพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดเท่ากับ 100W เช่นเดิม

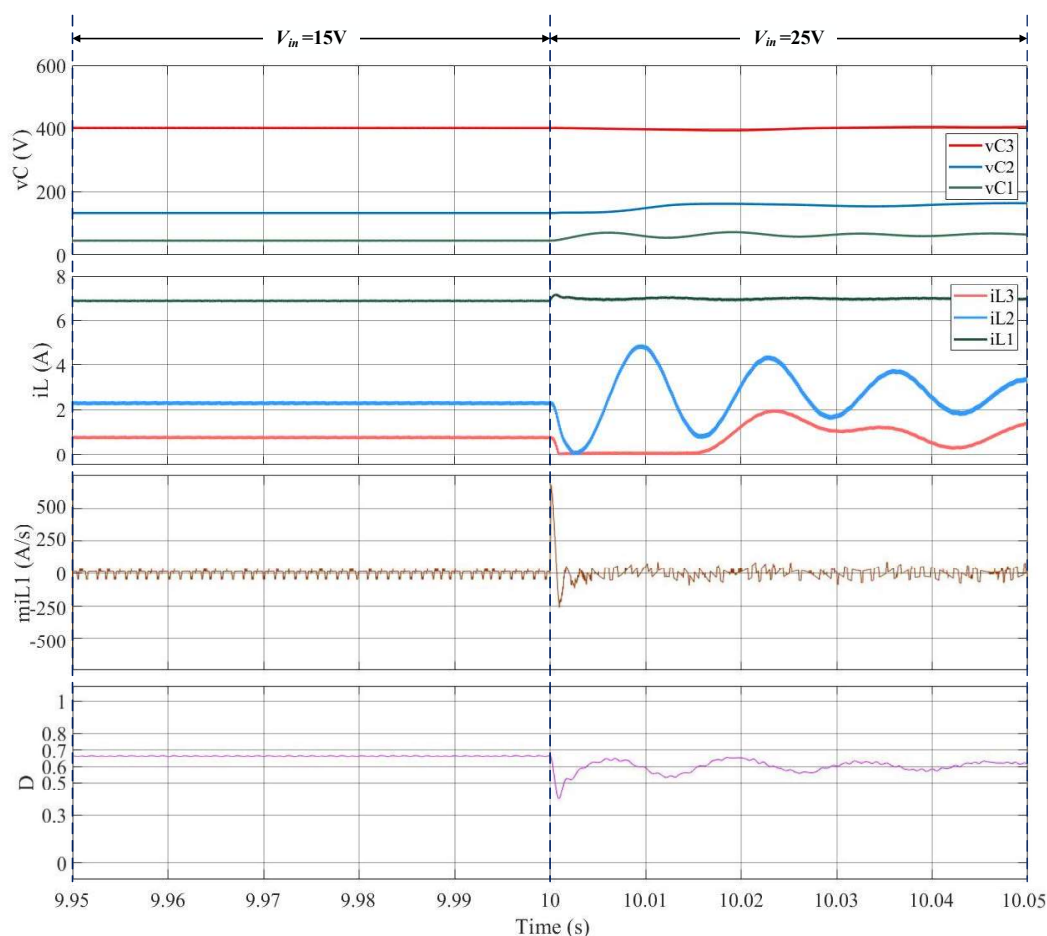


รูปที่ 5.2 ผลการจำลองพฤติกรรมการทำงานของวงจรเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต



รูปที่ 5.3 ภาพขยายพฤติกรรมการทำงานของวงจรเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต 20V เป็น 15V

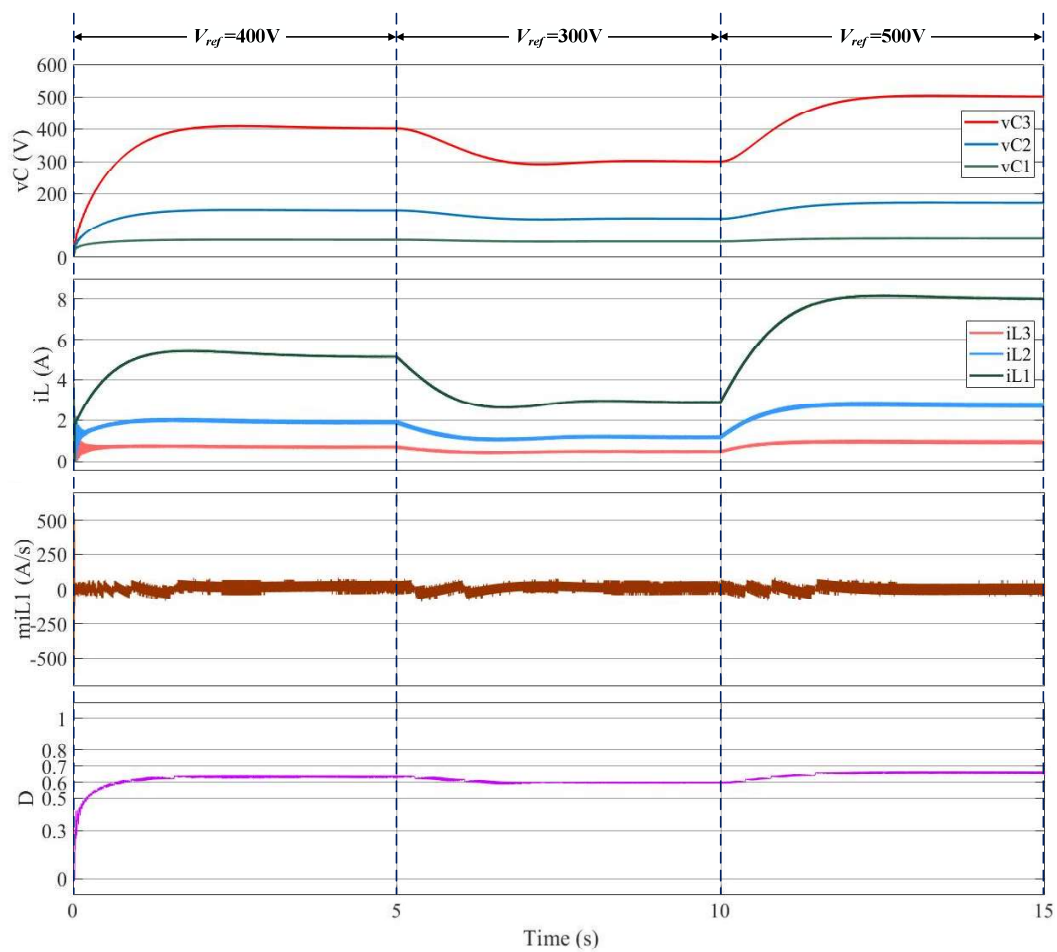
เมื่อพิจารณาภาพขยายพฤติกรรมการทำงานของวงจร ในรูปที่ 5.3 ณ วินาทีที่ 5 เมื่อแรงดันอินพุตลดลงจาก 20V เป็น 15V พบว่า v_{C3} และ i_{L1} ถูกควบคุมให้มีค่าคงที่ โดยที่ di_{L1}/dt มีการสั่นไหวต่ำกว่า -250A/s ในระยะเวลาสั้น ๆ เท่านั้น หลังจากนั้นจะมีค่าอยู่ในช่วง -100A/s ถึง 100A/s ส่วน D มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.63 เป็น 0.67 เพื่อรักษาระดับแรงดัน V_O เท่ากับ V_{ref} ที่ 400V เมื่อมีแรงดันอินพุต V_{in} ลดลงจาก 20V เป็น 15V



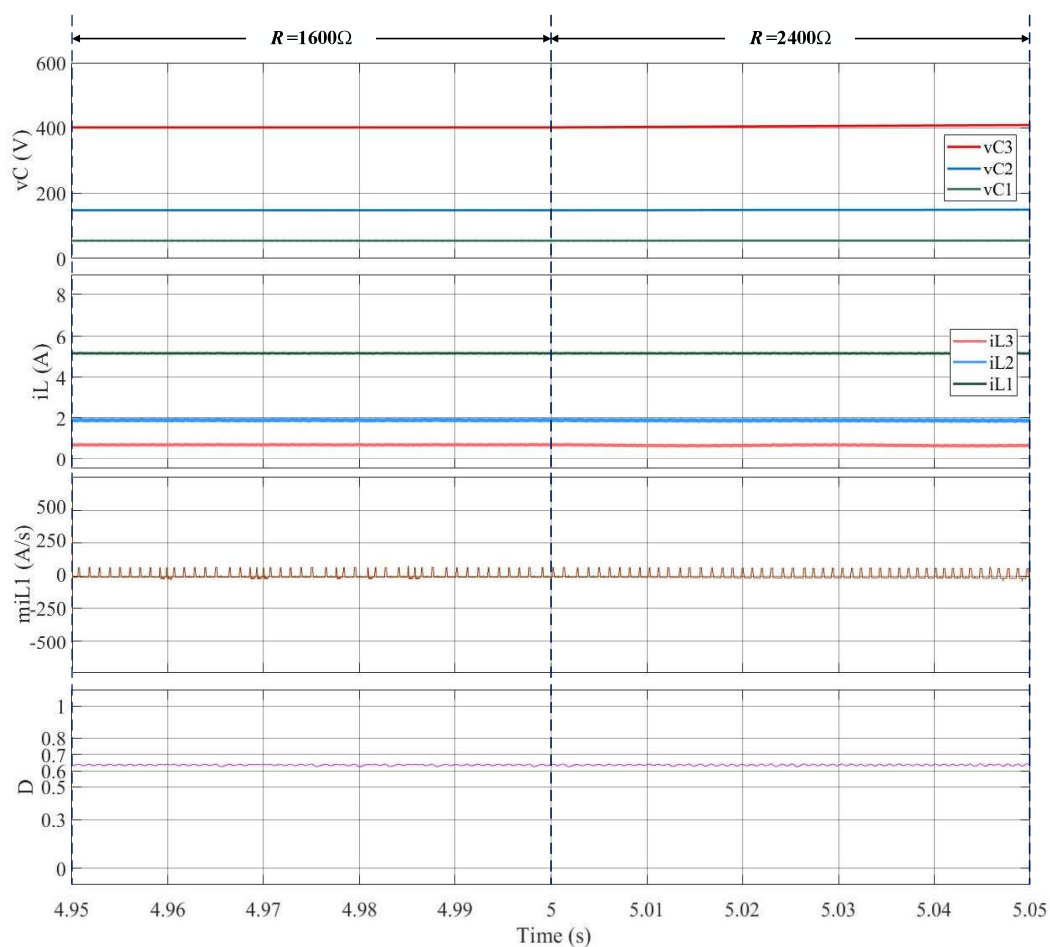
รูปที่ 5.4 ภาพขยายพฤติกรรมการทำงานของวงจรเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต 15V เป็น 25V

จากภาพขยายผลการจำลองพฤติกรรมรูปที่ 5.4 แรงดันอินพุตเพิ่มขึ้นจาก 15V เป็น 25V ณ เวลาที่ 10s เมื่อพิจารณาพฤติกรรมการทำงานของวงจรพบว่า v_{C3} และ i_{L1} ยังคงที่ ในขณะที่ m_{iL1} มีค่าการสั่นไหวที่สูงกว่า 250A/s ในระยะเวลาสั้น ๆ จากนั้น m_{iL1} จะคงที่ในช่วง -100A/s ถึง 100A/s ส่วน D มีค่าลดลงจาก 0.67 เป็น 0.6 ซึ่งเป็นผลมาจากการควบคุมฟีดแบ็คเพื่อให้ได้ V_O เท่ากับ 400V หรือ V_{ref} เมื่อมีแรงดันอินพุต V_{in} เพิ่มขึ้นจาก 15V เป็น 25V

กรณีที่ 2 การจำลองสถานการณ์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง V_{ref} เป็น 400V, 300V และ 500V ในช่วงเวลา 0s, 5s และ 10s ตามลำดับ โดยคงค่า V_{in} ที่ 20V และ R ที่ 1600Ω แสดงดังรูปที่ 5.5 พบว่าแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ (v_{C1} , v_{C2} , v_{C3}) และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (i_{L1} , i_{L2} , i_{L3}) ถูกควบคุมให้มีค่าเหมาะสมจากการควบคุมฟีดแบ็คที่พัฒนาขึ้นเพื่อรักษา V_O ให้มีค่าเท่ากับ V_{ref} ที่เปลี่ยนแปลง โดยในสภาวะอยู่ตัว D มีค่าคงที่ประมาณ 0.63, 0.60 และ 0.66 ตามลำดับ

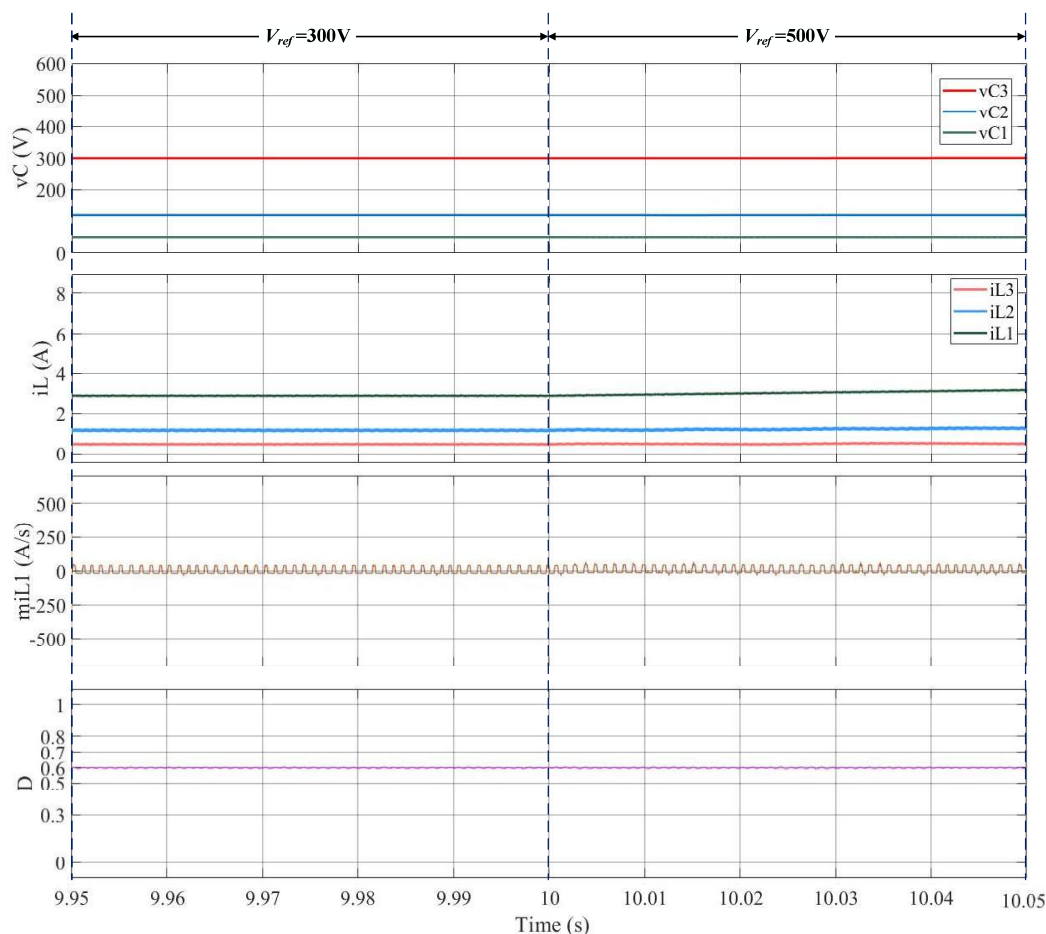


รูปที่ 5.5 ผลการจำลองพฤติกรรมการทำงานของวงจรเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิง



รูปที่ 5.6 ภาพขยายพฤติกรรมการทำงานของวงจรเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิง 400V เป็น 300V

เมื่อพิจารณาภาพขยายการจำลองพฤติกรรมในรูปที่ 5.6 ณ วินาทีที่ 5 เมื่อ V_{ref} ลดลง พบว่าค่ากระแสและแรงดันไม่มีการเปลี่ยนแปลงในช่วงเวลาที่พิจารณา โดย v_{C3} มีค่าเท่ากับ 400V ซึ่งเท่ากับ V_{ref} ส่วนค่ากระแส i_{L1} มีค่าประมาณ 5 A ค่า m_{iL1} อยู่ในช่วง -100A/s ถึง 100A/s และ D มีค่าประมาณ 0.63

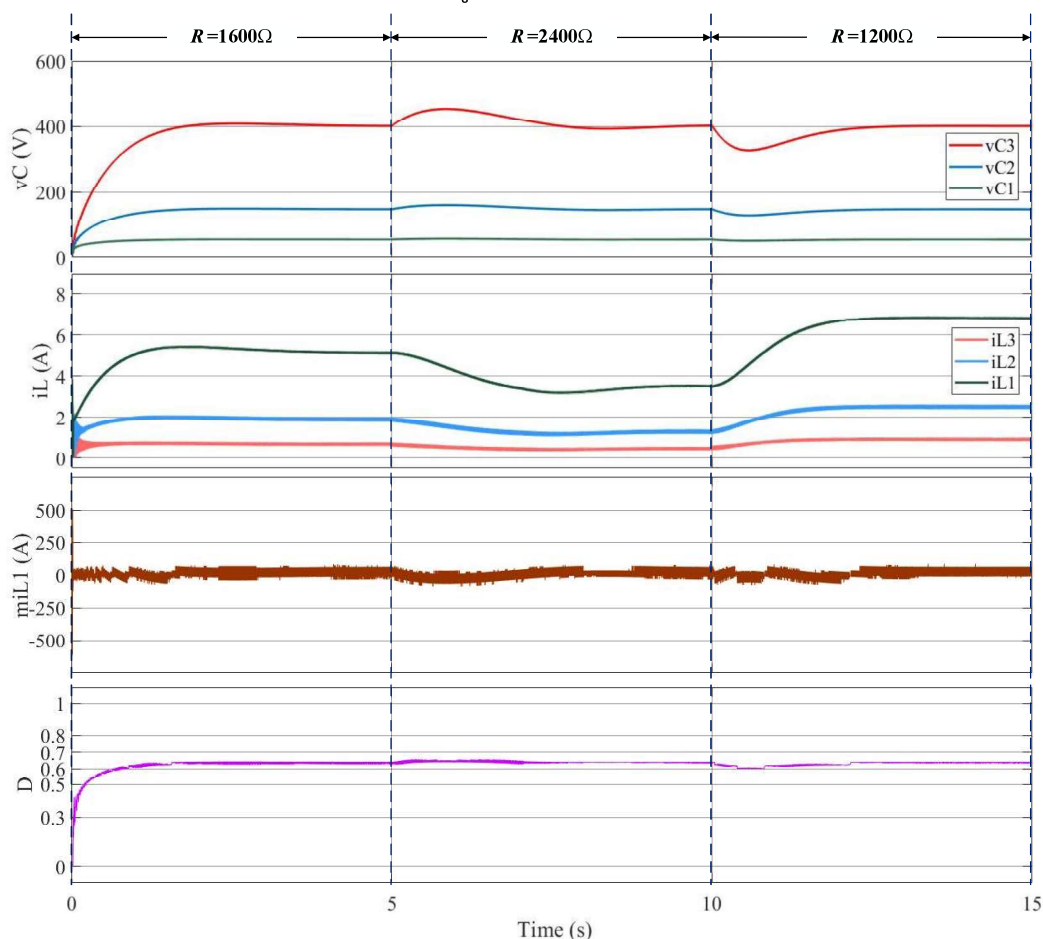


รูปที่ 5.7 ภาพขยายพฤติกรรมการทำงานของวงจรเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิง 300V เป็น 500V

จากภาพขยายการจำลองพฤติกรรมในรูปที่ 5.7 โดย V_{ref} เพิ่มขึ้น ณ เวลาที่ 10s เมื่อพิจารณาพบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นในช่วงเวลาที่พิจารณา โดย v_{C3} และ i_{L1} จากการทำงานของวงจรก่อนวินาทีที่ 10 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 300V และ 2.81A ตามลำดับ เช่นเดียวกันกับการเปลี่ยนแปลง m_{iL1} และ D ที่มีค่าอยู่ในช่วง -100A/s ถึง 100A/s และ 0.67 ตามลำดับ

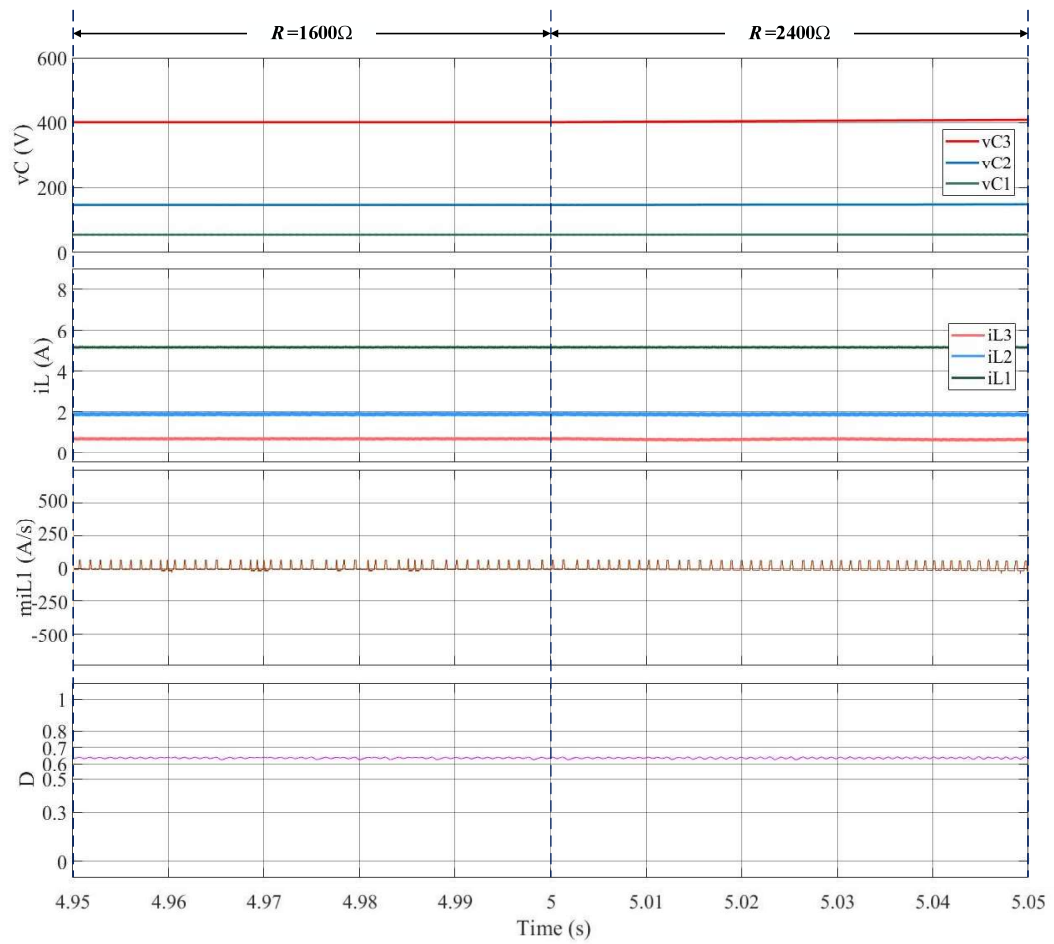
กรณีที่ 3 การจำลองสถานการณ์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลด R เป็น 1600Ω , 3200Ω และ 2400Ω ในช่วงเวลา 0s, 5s และ 10s ตามลำดับ โดยคงค่า V_{in} ที่ 20V และ V_{ref} ที่ 400V ผลการจำลองสถานการณ์แสดงดังรูปที่ 5.8 พบว่าแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ (v_{C1} , v_{C2} , v_{C3}) และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (i_{L1} , i_{L2} , i_{L3}) เกิดการพุ่งเกิน และลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อโหลด R เพิ่มขึ้น และลดลงตามลำดับ อย่างไรก็ตามตัวควบคุมฟัซซี่ยังคงค่า V_O ที่ 400V ได้ ทั้งนี้การเปลี่ยนแปลงโหลด R จะส่งผลโดยตรงต่อกำลังไฟฟ้า โดยเอาต์พุตในสถานะอยู่ตัวกำลังไฟฟ้าจะมีค่าเปลี่ยนแปลงเป็น 100W,

66.67W และ 133.33W ตามลำดับ เมื่อ V_{in} คงที่ค่ากระแส i_{L1} ถูกควบคุมให้มีค่าสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงโหลด R ที่เกิดขึ้น โดยในสภาวะอยู่ตัว i_{L1} มีค่าประมาณ 5A, 3.33A และ 6.67A ตามลำดับ

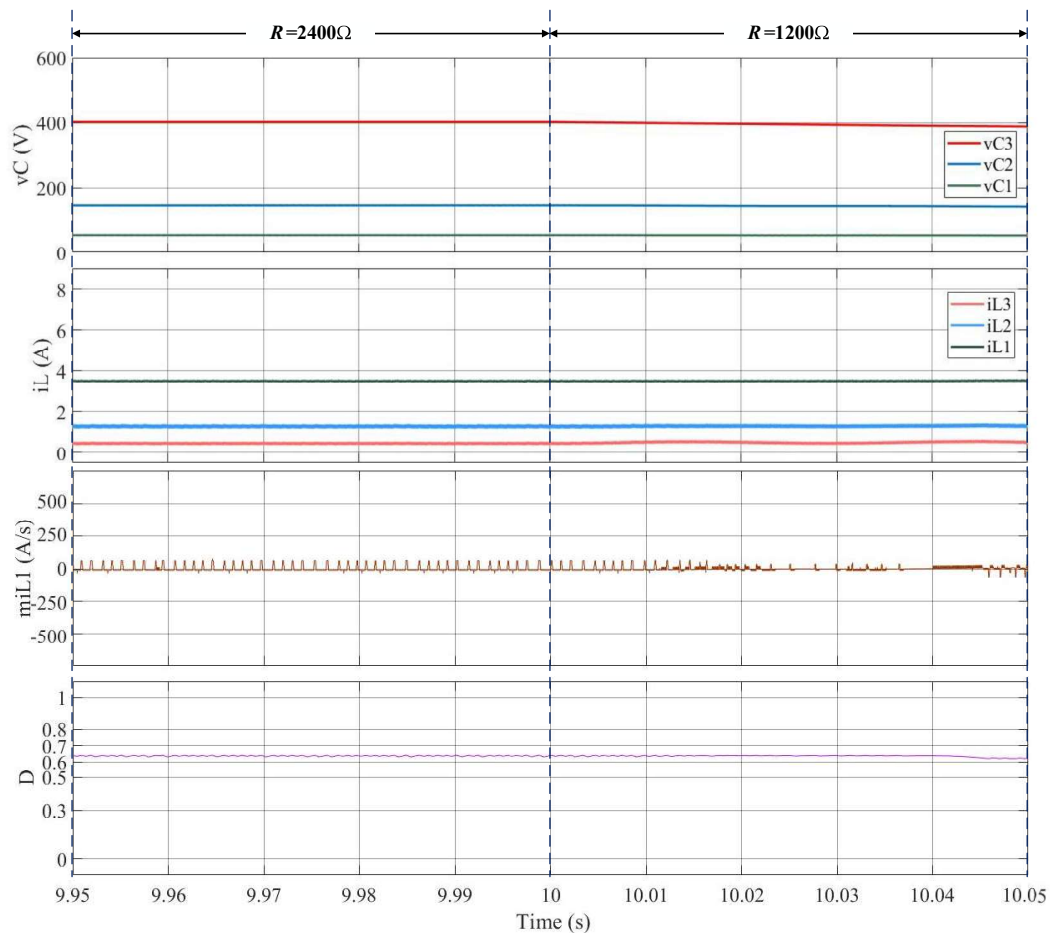


รูปที่ 5.8 พฤติกรรมการทำงานของวงจรเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทาน

ภาพขยายแสดงความแตกต่างพฤติกรรมการทำงานของวงจรเมื่อเปลี่ยนแปลงโหลด R ณ เวลาที่ 5s และ 10s ตามลำดับ แสดงดังในรูปที่ 5.9 และ 5.10 จะเห็นได้ว่าทั้งสองกรณีเปลี่ยนแปลง R ให้ผลตอบสนองของ v_{C3} และ i_{L1} ที่มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นเล็กน้อยในช่วงเวลาที่พิจารณา ส่วน m_{iL1} มีการเปลี่ยนแปลงที่คงที่ในช่วง $-100A/s$ ถึง $100A/s$ ส่วนค่า D จะถูกควบคุมให้มีค่าคงที่ประมาณ 0.63 เพื่อรักษา V_O ให้เท่ากับ V_{ref} ที่ 400V โดยที่มี V_{in} เป็น 20V



รูปที่ 5.9 ภาพขยายพฤติกรรมการทำงานวงจรกรณีเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทาน 1600Ω เป็น 2400Ω



รูปที่ 5.10 ภาพขยายพฤติกรรมการทำงานของวงจรเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทาน 2400 Ω เป็น 1200 Ω

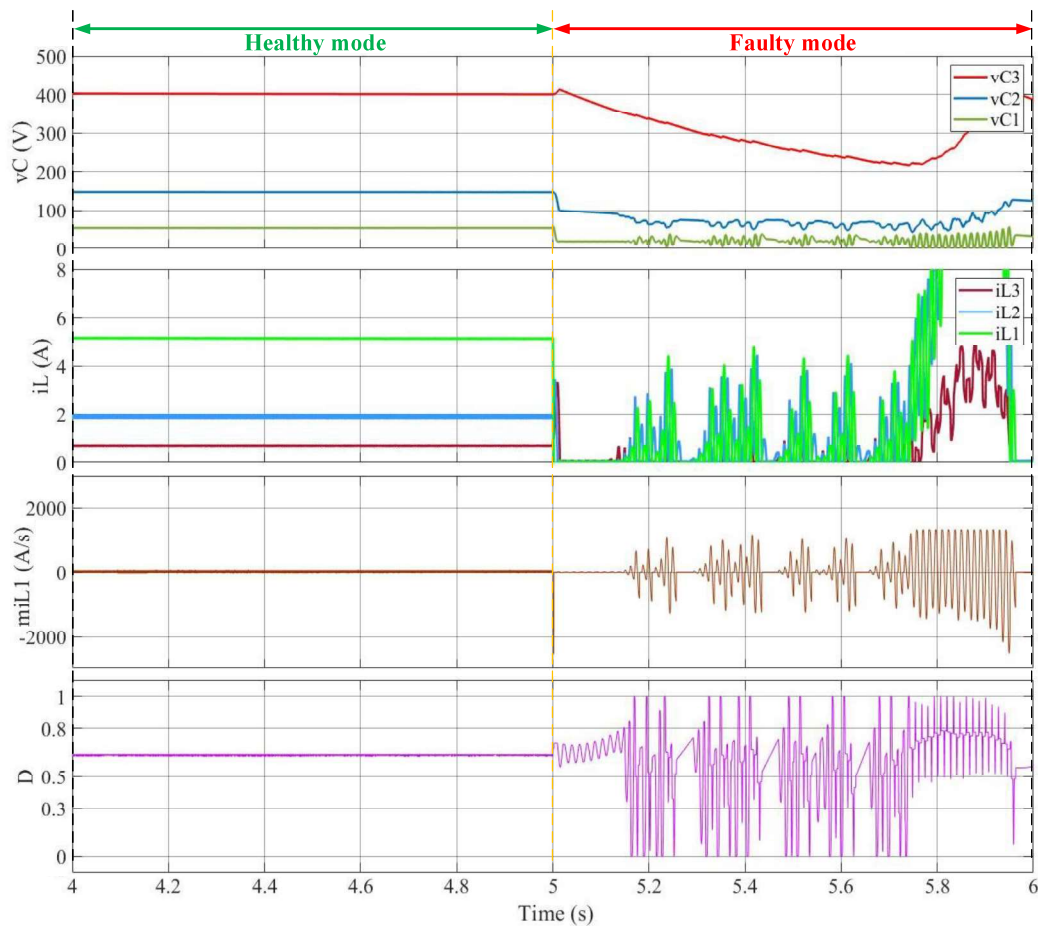
ในการศึกษาการทำงานของวงจรในสภาวะปกติ โดยพิจารณาการเปลี่ยนจุดการทำงานของวงจรทั้ง 3 กรณี สามารถสังเกตพฤติกรรมผลตอบสนองที่เกิดขึ้น เพื่อเปรียบเทียบกับผลตอบสนองที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะเกิดความผิดปกติ อีกทั้งยังเป็นแนวทางในพัฒนาวิธีการตรวจจับความผิดปกติให้มีความถูกต้อง และรวดเร็ว

5.2.2 การจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นเมื่อเกิดความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจร

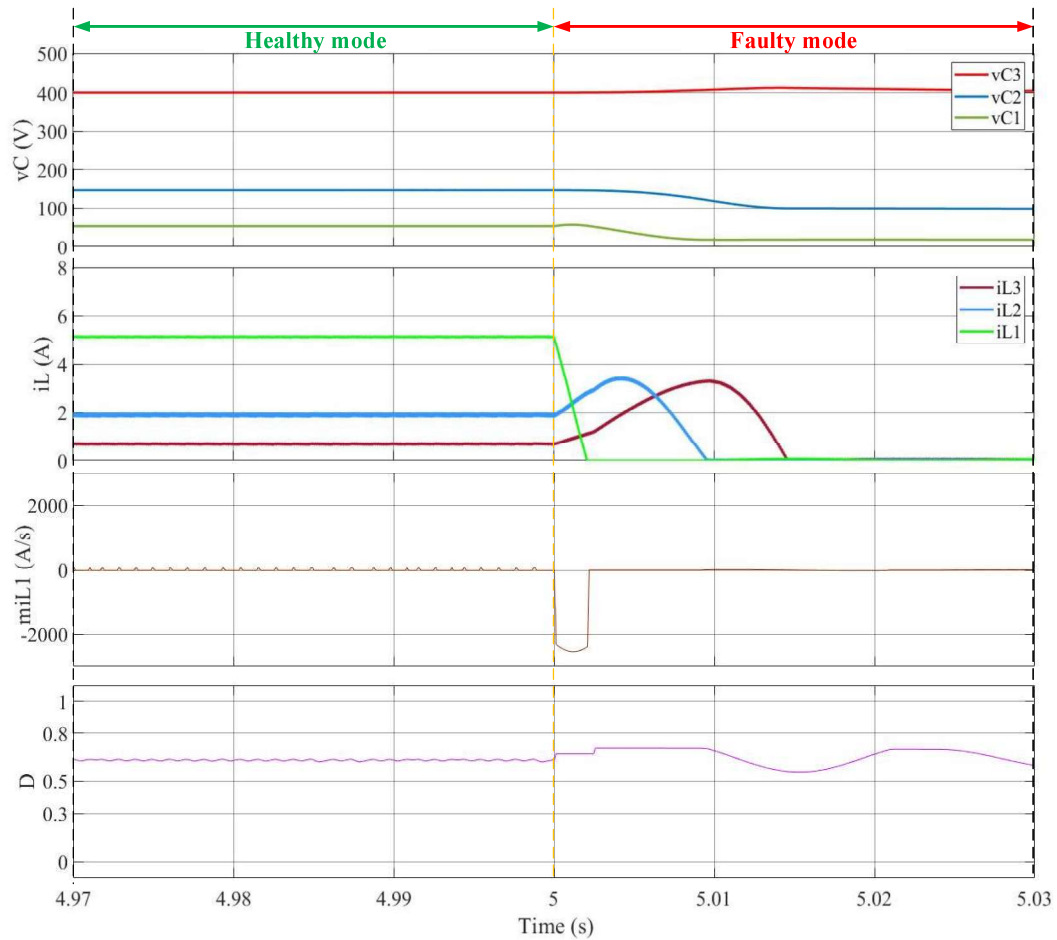
การจำลองสถานการณ์กำหนดให้ V_{ref} เป็น 400V, R เป็น 1600 Ω และ V_{in} เป็น 20V คงที่ตลอดการจำลองสถานการณ์ โดยผลการจำลองสถานการณ์พบว่าพฤติกรรมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นในสภาวะปกติ (Healthy mode) ภายใต้การควบคุมฟuzzy ที่พัฒนาขึ้น สามารถควบคุมแรงดัน V_O ให้มีค่าเพิ่มขึ้นจากศูนย์ไปยัง V_{ref} ที่ 400V อีกทั้งแรงดันตกคร่อม

ตัวเก็บประจุ (v_{C1} , v_{C2} , v_{C3}) และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (i_{L1} , i_{L2} , i_{L3}) มีผลตอบสนองคงที่ในสภาวะอยู่ตัว หลังจากนั้นวินาทีที่ 5 จะเกิดความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจร (Faulty mode) ทั้งนี้การจำลองสถานการณ์จะพิจารณากรณีที่สวิตช์ตัวใดตัวหนึ่งเกิดความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรเท่านั้น ซึ่งจะแบ่งการจำลองสถานการณ์ออกเป็น 3 กรณี ประกอบด้วยการจำลองสถานการณ์ความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_1 , S_2 และ S_3 ตามลำดับ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

กรณีที่ 1 การจำลองสถานการณ์ความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_1 แสดงดังรูปที่ 5.11 จากผลการจำลองสถานการณ์พบว่าแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ (v_{C1} , v_{C2} , v_{C3}) และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (i_{L1} , i_{L2} , i_{L3}) มีค่าลดลง และเกิดการสั่นไหวอย่างชัดเจน รวมทั้ง m_{iL1} และ D เกิดการสั่นไหว และไม่สามารถรักษาค่าตาม V_{ref} ที่ 400 V ได้



รูปที่ 5.11 พฤติกรรมการทำงานของวงจรกรณีเกิดความผิดปกติที่ S_1

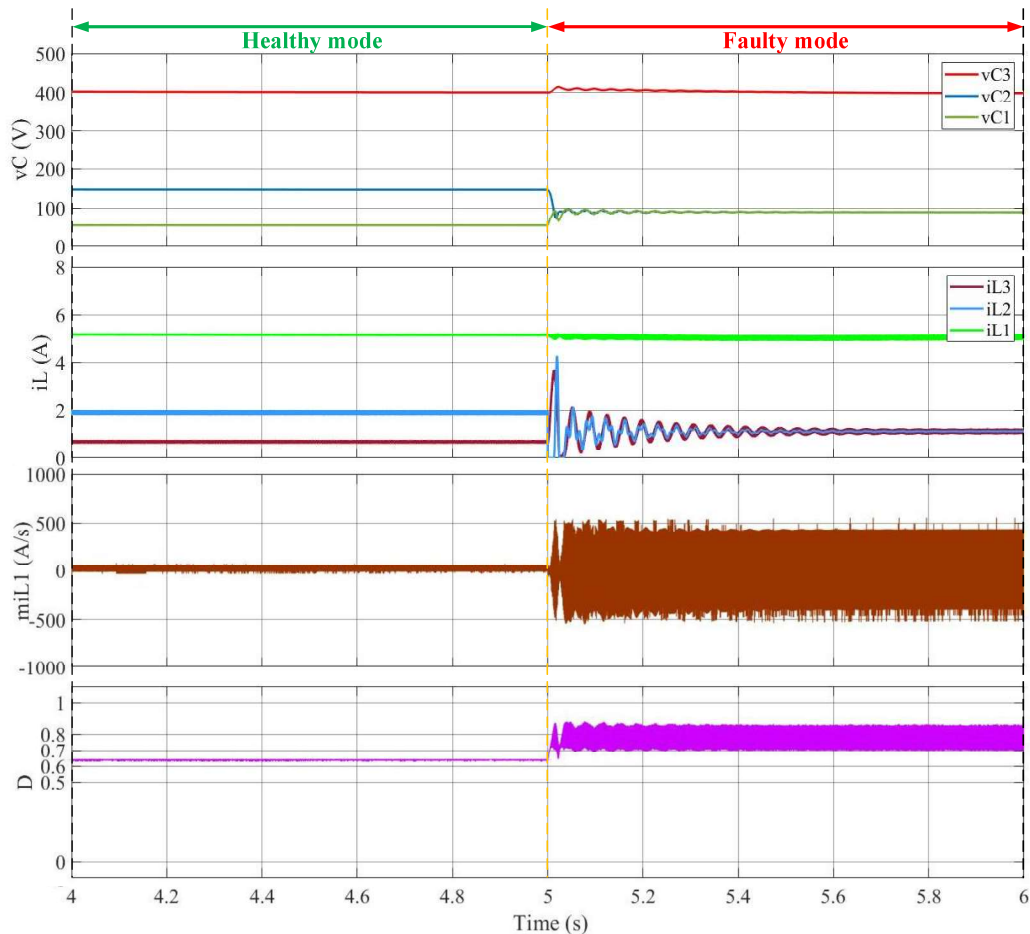


รูปที่ 5.12 ภาพขยายพฤติกรรมการทำงานของวงจรกรณีเกิดความผิดปกติที่ S_1

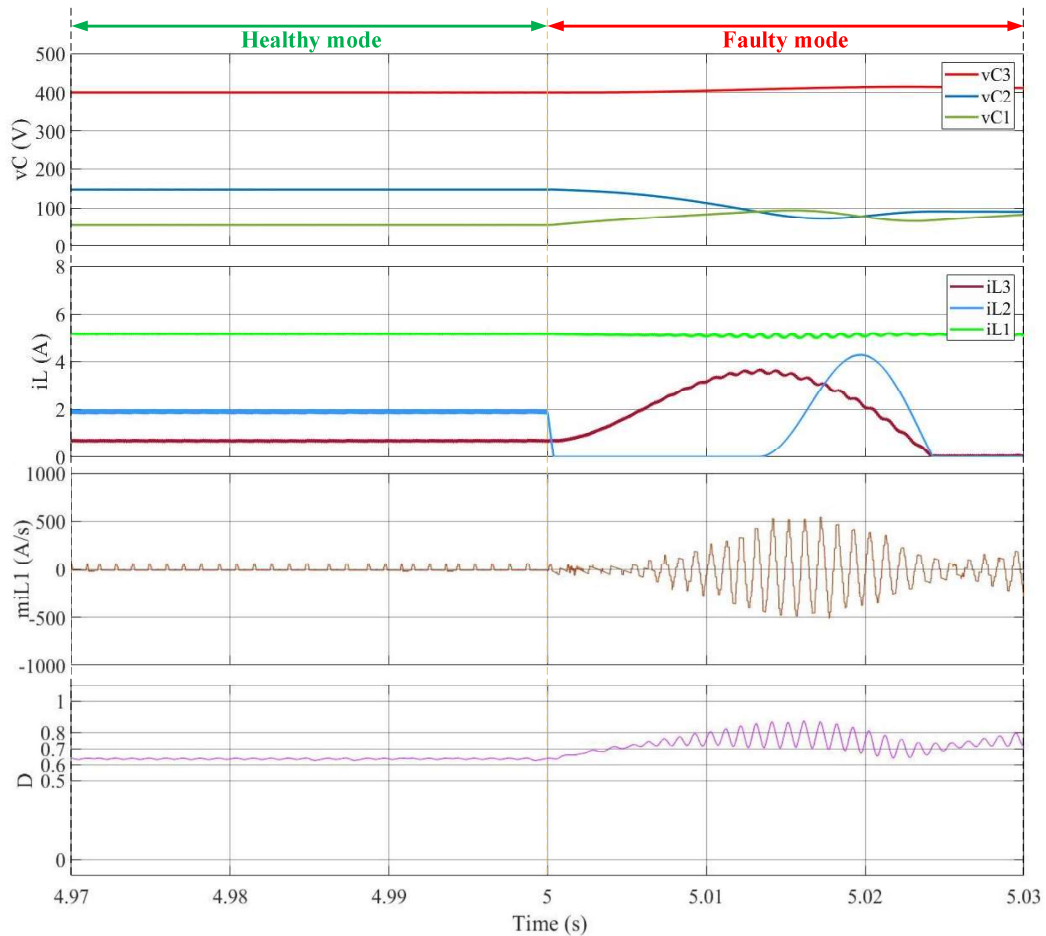
เมื่อพิจารณาภาพขยายเพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมการทำงานของวงจรระหว่างสภาวะปกติและเมื่อเกิดความผิดปกติที่ S_1 ดังแสดงในรูปที่ 5.12 พบว่าพฤติกรรมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นหลังจากเกิดความผิดปกติ i_{L1} จะลดลงอย่างรวดเร็ว จากค่าประมาณ 5A ลดลงจนถึง 0A ใช้เวลาประมาณ 3ms ส่วน m_{iL1} มีค่าติดลบเนื่องจากการที่กระแสลดลงอย่างรวดเร็วโดยมีค่าประมาณ -2300A/s ส่วนแรงดัน v_{C1} , v_{C2} และ v_{C3} มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ในขณะที่ D มีค่าไม่คงที่ จะเห็นได้ว่า i_{L1} และ m_{iL1} มีผลตอบสนองที่เปลี่ยนแปลงรวดเร็วอย่างเห็นได้ชัด จึงพิจารณาค่าดังกล่าวเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาวิธีการตรวจจับความผิดปกติที่ S_1 โดยรายละเอียดจะถูกนำเสนอในหัวข้อถัดไป

กรณีที่ 2 การจำลองสถานการณ์ความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_2 แสดงดังรูปที่ 5.13 พบว่าตัวควบคุมฟัซซี่ยังสามารถที่จะเพิ่ม และรักษา V_O มีค่าประมาณ V_{ref} ได้ อย่างไรก็ดีตามแรงดัน v_{C1} และ v_{C2} เกิดการสั่นไหวเล็กน้อย หลังจากนั้นแรงดันทั้งสองจะมีค่าเท่ากันประมาณ 90V ในสภาวะอยู่

ตัว ส่วนกระแส i_{L2} และ i_{L3} เกิดการสั่นไกวอย่างเห็นได้ชัด หลังจากนั้นกระแสทั้งสองจะมีเท่ากัน ค่าประมาณ 1.2A ในสภาวะอยู่ตัว เมื่อพิจารณา m_{iL1} พบว่าเกิดการสั่นไกวที่มากกว่าในสภาวะปกติอย่างเห็นได้ชัด โดยมีค่าการเปลี่ยนแปลงเกินขอบเขต -250A/s ถึง 250A/s ส่วน D เพิ่มขึ้นจาก 0.63 เป็น 0.78 อย่างรวดเร็ว และไม่ควรที่ เกิดการเปลี่ยนแปลงค่ามากกว่าในสภาวะปกติอย่างเห็นได้ชัดเช่นกัน โดยที่สภาวะอยู่ตัวมีค่าประมาณ 0.77 เพื่อรักษา V_O ให้เท่ากับ V_{ref} ที่ 400V



รูปที่ 5.13 พฤติกรรมการทำงานของวงจรนี้เกิดความผิดปกติที่ S_2

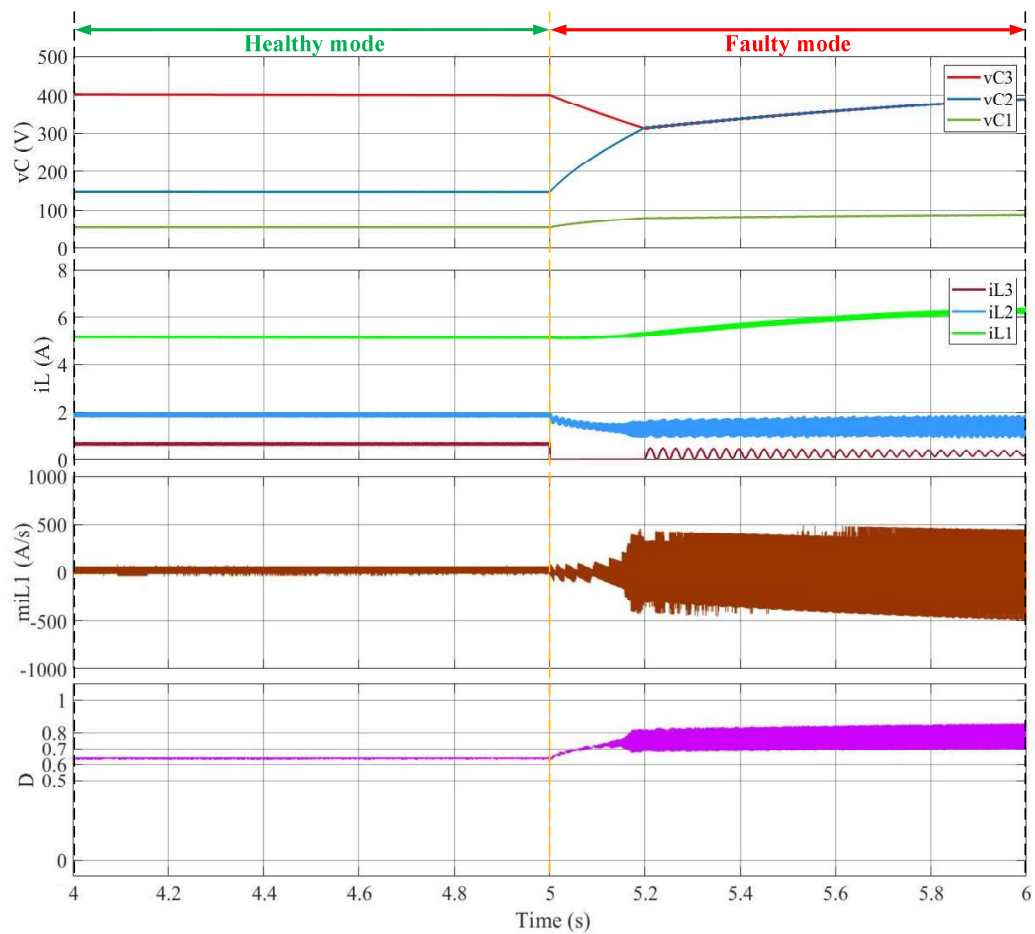


รูปที่ 5.14 ภาพขยายพฤติกรรมการทำงานของวงจรกรณีเกิดความผิดปกติที่ S_2

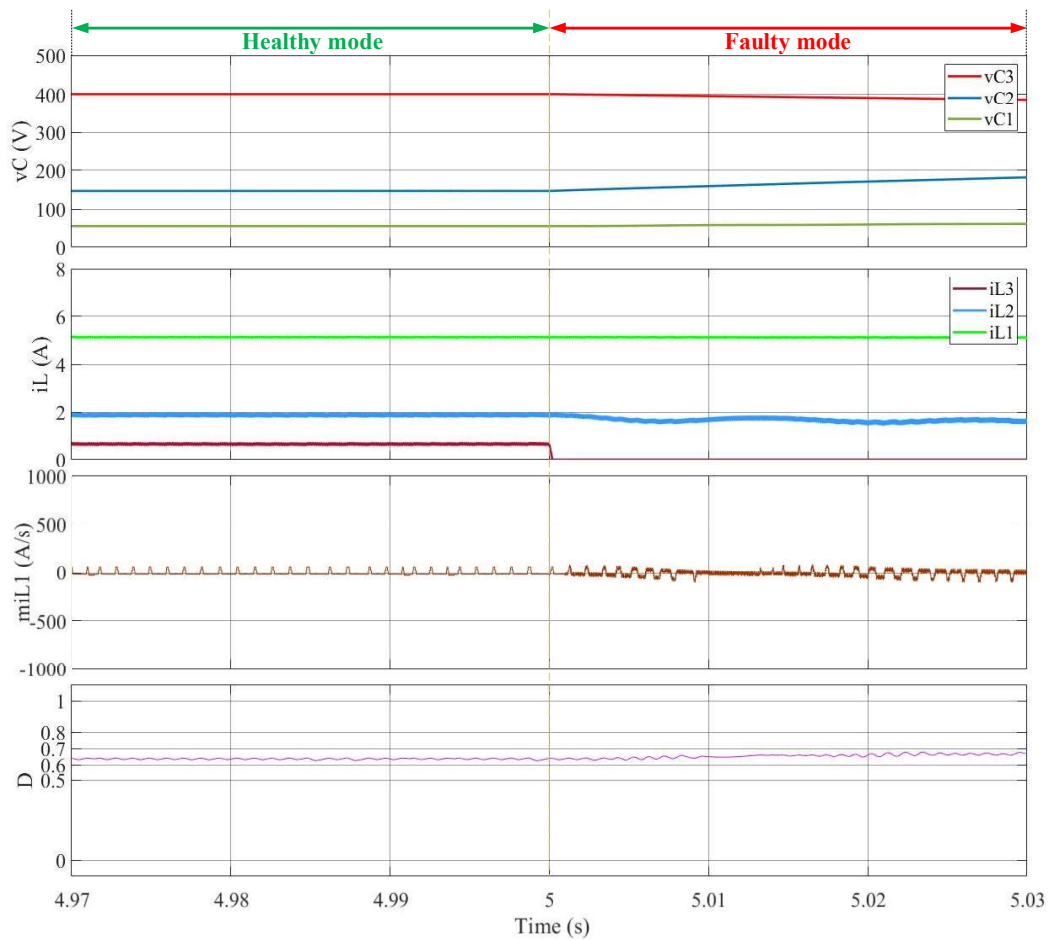
จากภาพขยายเพื่อพิจารณาพฤติกรรมการทำงานของวงจรในรูปที่ 5.14 แสดงให้เห็นความแตกต่างพฤติกรรมการทำงานของวงจรระหว่างสภาวะปกติ และเมื่อเกิดความผิดปกติที่ S_2 จากผลการจำลองสถานการณ์พบว่าพฤติกรรมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น หลังจากเกิดความผิดปกติ จะสังเกตได้ว่าแรงดัน v_{C3} มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย กระแส i_{L1} มีการสั่นไหวเล็กน้อย เมื่อพิจารณา m_{iL1} พบว่าหลังจากเกิดความผิดปกติมีการสั่นไหวทันทีอย่างเห็นได้ชัด สัญญาณ D มีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้น m_{iL1} และ D มีผลตอบสนองที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว จึงพิจารณาค่าดังกล่าวเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาวิธีการตรวจจับความผิดปกติที่ S_2 โดยรายละเอียดจะถูกนำเสนอในหัวข้อถัดไป

กรณีที่ 3 การจำลองสถานการณ์ความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_3 แสดงดังรูปที่ 5.15 พบว่าการควบคุมฟัซซี่ ยังคงสามารถรักษา V_O ตามที่ต้องการได้ อย่างไรก็ตามแรง v_{C1} และ v_{C2} มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 90V และ 400V ตามลำดับ ส่วนแรงดัน v_{C3} มีค่าลดลงจากการคายประจุให้กับโหลดตัวต้านทาน หลังจากนั้นค่าเพิ่มขึ้นเข้าหา V_{ref} โดยใช้เวลาเข้าที่ประมาณ 1s ส่วนผลตอบสนองกระแสที่ไหล

ผ่านตัวเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นพบว่า i_{L1} มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วน i_{L2} มีค่าลดลงเล็กน้อย หลังจากนั้นเกิดการสั้นไกวอย่างเห็นได้ชัด และ i_{L3} มีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว และคงที่ 0A ประมาณ 0.2s หลังจากนั้น i_{L1} เพิ่มขึ้นแบบสั้นไกว เมื่อพิจารณา m_{iL1} พบว่าในช่วงแรกค่าไม่เปลี่ยนแปลงประมาณ 0.17s หลังจากนั้นเกิดการสั้นไกว โดยมีค่าการเปลี่ยนแปลงมากกว่าในสภาวะปกติอย่างเห็นได้ชัด ส่วน D มีค่าเพิ่มขึ้น และเกิดการสั้นไกวมากกว่าในสภาวะปกติ โดยที่สภาวะอยู่ตัวมีค่าประมาณ 0.77 เพื่อรักษา V_O ให้เท่ากับ V_{ref} ที่ 400V



รูปที่ 5.15 พฤติกรรมการทำงานของวงจรกรณีเกิดความผิดปกติที่ S_3



รูปที่ 5.16 ภาพขยายพฤติกรรมการทำงานของวงจรกรณีเกิดความผิดปกติที่ S_3

ในการพิจารณาความแตกต่างพฤติกรรมการทำงานของวงจรระหว่างสภาวะปกติ และเมื่อเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_3 จะอาศัยภาพขยายพฤติกรรมการทำงานของวงจรในรูปที่ 5.16 พบว่าพฤติกรรมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นหลังจากเกิดความผิดปกติตอบสนองของ v_{C3} มีค่าลดลงจากการคายประจุ ส่วนกระแส i_{L1} มีค่าเพิ่มขึ้น หลังจากนั้นมีการสั่นไกวเล็กน้อย ส่วน m_{iL1} มีการสั่นไกวเล็กน้อยเช่นกัน และสัญญาณ D มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ดังนั้นจึงพิจารณาค่า v_{C3} เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาวิธีการตรวจจับความผิดปกติที่ S_3 โดยรายละเอียดจะถูกนำเสนอในหัวข้อถัดไป

จากผลการจำลองสถานการณ์แสดงพฤติกรรมของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นภายใต้การควบคุมพัลส์ที่พัฒนาขึ้นดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น ทั้งในสภาวะปกติที่มีการเปลี่ยนแปลงจุดการทำงานของวงจร และในสภาวะที่เกิดความผิดปกติแบบเปิดวงจรของทั้งสามสวิตช์ จะเห็นได้ว่าค่ากระแส i_{L1} และแรงดัน V_O ที่ได้จากตัวตรวจจับกระแส และตัวตรวจจับแรงดันที่ใช้ใน

กระบวนการควบคุมฟuzzyที่พัฒนาขึ้น รวมถึงสัญญาณ D ที่ได้จากการควบคุมฟuzzyที่พัฒนาขึ้นมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด เมื่อเกิดความผิดปกติที่สวิตช์แต่ละตัว ข้อมูลเหล่านี้จะถูกนำไปใช้ในการตรวจจับความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรสรุปได้ดังตารางที่ 5.1

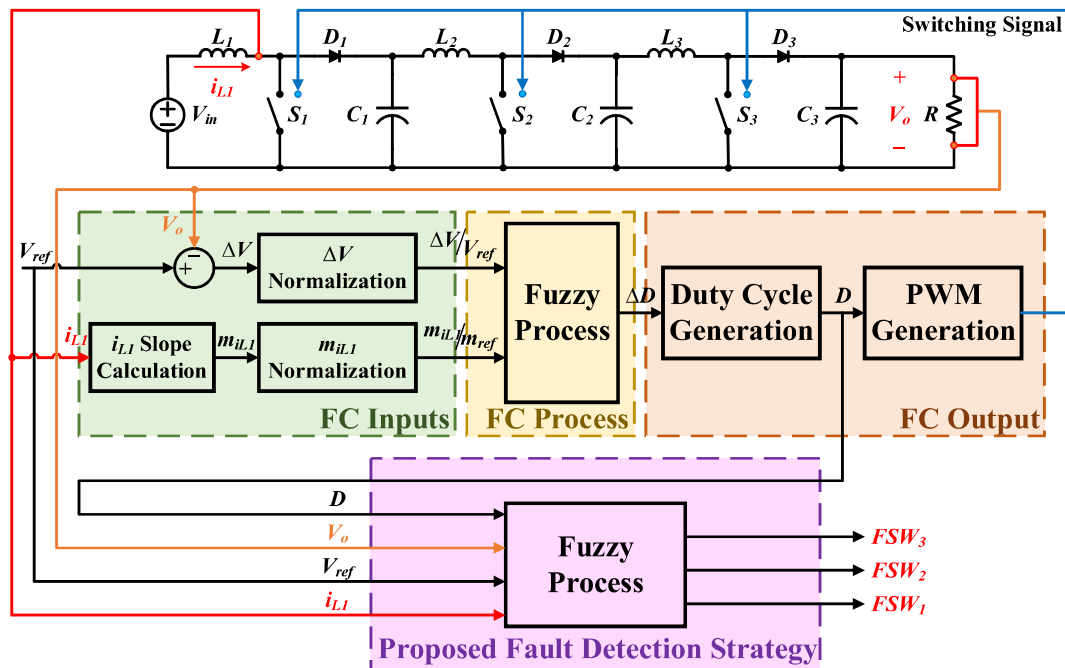
ตารางที่ 5.1 ข้อมูลที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจร

ความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจร	พารามิเตอร์ที่พิจารณา
S_1	ค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่ 1 (i_{L1})
S_2	ค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่ 1 (i_{L1}) และ ค่าวัฏจักรหน้าที่ของสวิตช์ (D)
S_3	ค่าแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุตัวที่ 3 (v_{C3})

ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงรวดเร็วอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเกิดความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรเหล่านี้สามารถนำไปใช้พัฒนาวิธีการตรวจจับความผิดปกติ รวมถึงพัฒนาการสร้างความคงทนต่อความผิดปกติให้กับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์เรียงต่อกันสามขั้นภายใต้การควบคุมฟuzzyที่พัฒนาขึ้นเพื่อให้ยังคงสามารถทำงานต่อไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ และต่อเนื่อง

5.3 วิธีการตรวจจับและระบุตำแหน่งความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรที่พัฒนาขึ้น

จากการศึกษาพฤติกรรมของค่าพารามิเตอร์ที่สามารถตรวจจับความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจร ประกอบด้วยกระแส i_{L1} แรงดัน v_{C3} และสัญญาณ D ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์เรียงต่อกันสามขั้นภายใต้ตัวควบคุมฟuzzyที่พัฒนาขึ้นดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในขั้นต้น สามารถนำมาพัฒนาวิธีการตรวจจับความผิดปกติ (Fault detection strategy) พร้อมทั้งยังสามารถระบุตำแหน่งสวิตช์ที่เกิดความผิดปกติภายในวงจร (Fault identification) โดยใช้กระบวนการฟuzzyแสดงดังรูปที่ 5.17 ทั้งนี้จะพิจารณากรณีที่สวิตช์ตัวใดตัวหนึ่งเกิดความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรเท่านั้น

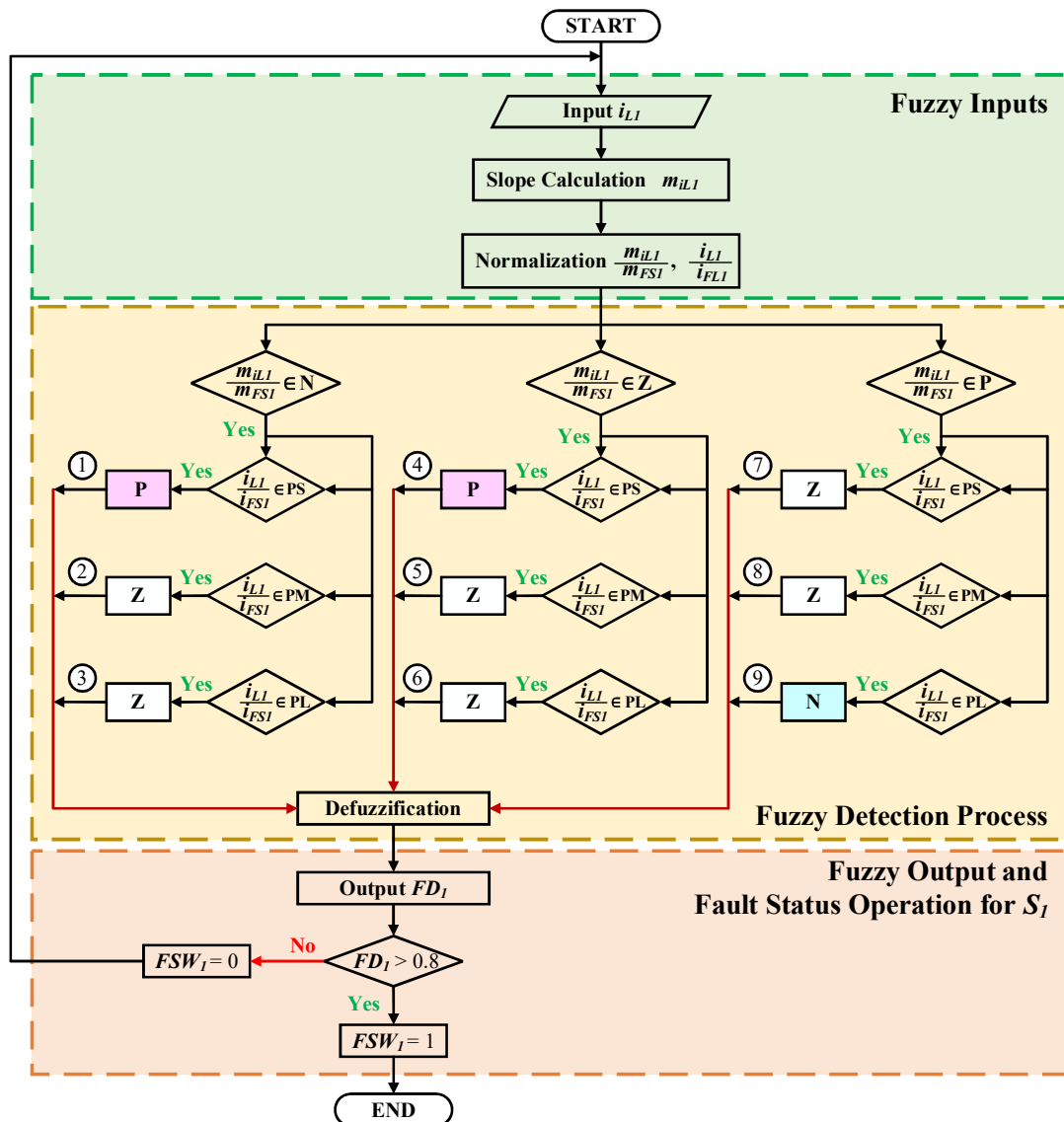


รูปที่ 5.17 โครงสร้างการควบคุมฟัซซีที่พัฒนาขึ้นร่วมกับการตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจร

ในกระบวนการตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรจะแสดงผลเอาต์พุตที่เป็นสถานะการตรวจจับความผิดปกติของสวิตช์ทั้งสามตัว (FSW_1 , FSW_2 , FSW_3) โดยหากการทำงานของวงจรอยู่ในสภาวะปกติ (Healthy mode) สถานะการตรวจจับความผิดปกติของสวิตช์จะแสดงค่าเป็นศูนย์ ($FSW_n = 0$) แต่หากเกิดความผิดปกติ (Faulty mode) สถานะการตรวจจับความผิดปกติของสวิตช์จะแสดงค่าเป็นหนึ่ง ($FSW_n = 1$) ในการตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรของสวิตช์แต่ละตัวมีวิธีการที่แตกต่างกัน ซึ่งเกิดจากการสังเกตพฤติกรรมที่เกิดขึ้นเมื่อเกิดความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรของสวิตช์แต่ละตัว และนำไปสู่การพัฒนาวิธีการตรวจจับความผิดปกติโดยใช้ตรรกศาสตร์คลุมเครือ หรือฟัซซีลอจิก (Fuzzy logic) โดยมีเนื้อหาดังต่อไปนี้

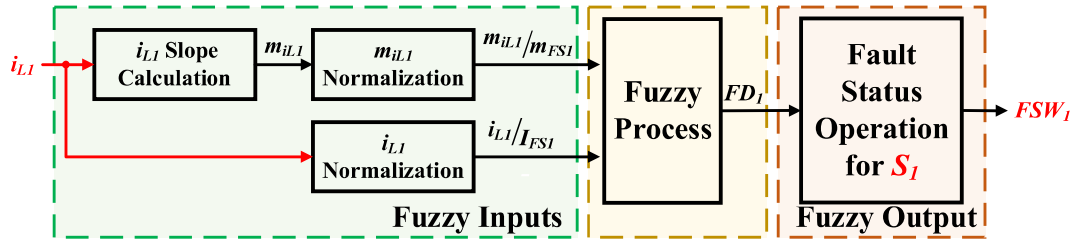
5.3.1 การตรวจจับความผิดปกติที่ S_1

จากการสังเกตพฤติกรรมของวงจรเมื่อการเกิดความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_1 จะเห็นได้ว่ากระแส i_{L1} และ m_{iL1} มีการเปลี่ยนแปลงที่รวดเร็วอย่างเห็นได้ชัด แผนภาพวิธีการตรวจจับความผิดปกติที่ S_1 แสดงดังรูปที่ 5.18



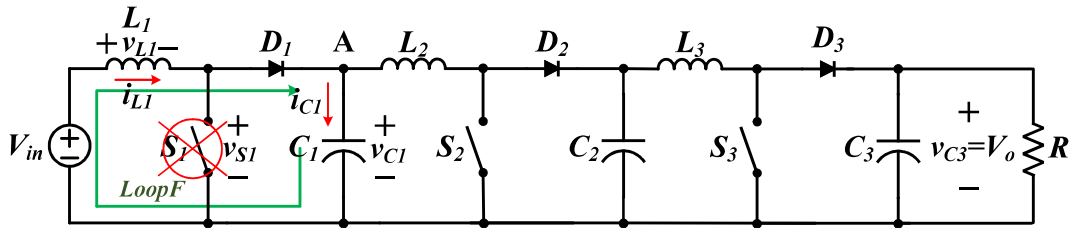
รูปที่ 5.18 แผนภาพวิธีการตรวจจับความผิดปกติของ S_1

จากแผนภาพวิธีการตรวจจับความผิดปกติของ S_1 ที่แสดงดังรูปที่ 5.19 อินพุตของการตรวจจับความผิดปกติของ S_1 ประกอบด้วย ความชันของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่ 1 (m_{iL1}) และกระแส i_{L1} ที่ถูกปรับค่าสเกลในกระบวนการนอร์มัลไลซ์ด้วยค่าความชันของกระแสขณะเกิดความผิดปกติของ S_1 (m_{FSI}) และกระแสที่ไหลผ่าน L_1 ในสภาวะปกติ (i_{FSI}) ตามลำดับ ซึ่งจะถูกลำถึงในขั้นถัดไป



รูปที่ 5.19 โครงสร้างของการตรวจจับความผิดปกติที่ S_1

จากโครงสร้างของการตรวจจับความผิดปกติที่ S_1 ดังแสดงในรูปที่ 5.19 จะเห็นได้ว่า อินพุตค่าแรกเริ่มจากกระบวนการคำนวณค่าความชันของ i_{L1} ให้ได้ค่าความชัน m_{iL1} จากนั้นจะเข้าสู่กระบวนการ m_{iL1} Normalization เพื่อปรับค่าสเกลด้วย m_{FS1} ที่ได้จากการพิจารณาวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นเมื่อเกิดความผิดปกติที่ S_1 ที่แสดงในรูปที่ 5.20



รูปที่ 5.20 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นเมื่อเกิดความผิดปกติที่ S_1

จากการวิเคราะห์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นในบทที่ 3 ในสภาวะปกติ (Healthy mode) สามารถพิจารณาค่า v_{C1} ได้จากอัตราขยายแรงดันของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ขั้นที่ 1 สมการที่ (3.24) ซึ่งจะสามารถวิเคราะห์หาขนาด m_{FS1} จากกฎแรงดันไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ดังสมการที่ (5.1)

$$\text{ลูป F :} \quad -V_{in} + v_{L1} + v_{C1} = 0$$

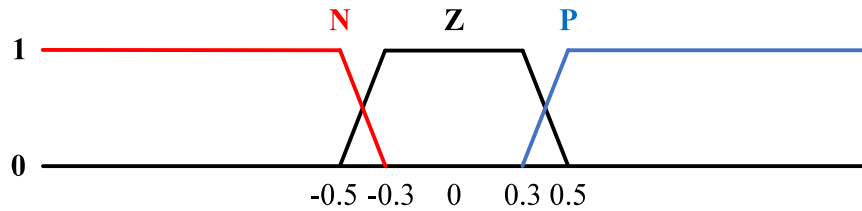
$$m_{FS1} = \left| \frac{di_{L1}}{dt} \right| = \left| \frac{V_{in} - V_{C1}}{L_1} \right| = \frac{V_{in} D}{L_1 (1 - D)} \quad (5.1)$$

อินพุตค่าที่สองของกระบวนการฟัซซีเป็น i_{L1} ที่ปรับค่าสเกลด้วย i_{FS1} โดยคำนวณ i_{FS1} ได้ดังสมการที่ (5.2) ซึ่งพิจารณาได้จากอัตราขยายกระแสของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นในบทที่ 3 จากสมการ (3.32)

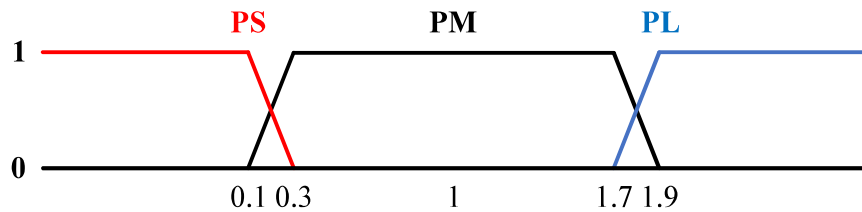
$$i_{FS1} = \frac{I_o}{M_f} = \frac{V_{ref}}{R(1-D)^3} \quad (5.2)$$

ดังนั้นเมื่อพิจารณาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้กำหนดไว้ในตารางที่ 3.3 และ 3.4 ในบทที่ 3 จะสามารถคำนวณค่า m_{FS1} และ i_{FS1} เท่ากับ 2,319A/s และ 5A ตามลำดับ

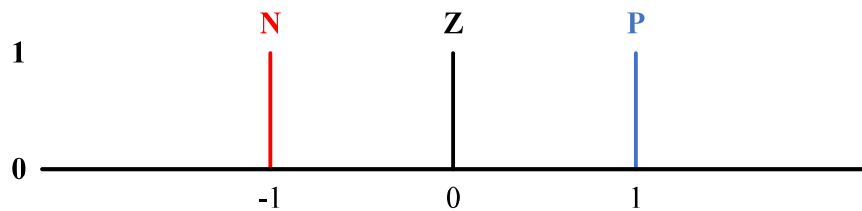
จากผลตอบสนองการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น เมื่อเกิดความผิดพร่องที่ S_1 สามารถพิจารณาฟังก์ชันสมาชิกระหว่างฟัซซีเซตของค่า m_{iL1} และ i_{L1} ที่ถูกนอร์มัลไลซ์ (Normalization) ในขอบเขตที่เหมาะสม ดังรูปที่ 5.21 และ 5.22 ตามลำดับ ซึ่งได้จากการสังเกตพฤติกรรมการทำงานของวงจร



รูปที่ 5.21 ฟังก์ชันสมาชิกอินพุต m_{iL1}/m_{FS1}



รูปที่ 5.22 ฟังก์ชันสมาชิกอินพุต i_{L1}/i_{FS1}



รูปที่ 5.23 ฟังก์ชันสมาชิกเอาต์พุตค่าสัญญาณความผิดพร่องที่สวิตช์ตัวที่ 1 (FD_1)

จากการสังเกตพฤติกรรมการทำงานของวงจร จะกำหนดรูปร่างของฟังก์ชันสมาชิก อินพุตทั้งสองเป็นแบบเหลี่ยมคางหมู และพิจารณาค่าเชิงภาษาของฟังก์ชันสมาชิกได้ดังนี้ ฟังก์ชันสมาชิกอินพุต m_{iL1}/m_{FS1} กำหนดค่าเชิงภาษาของฟังก์ชันสมาชิก 3 เซต ได้แก่ “Negative: N”, “Zero: Z” และ “Positive: P” ส่วนฟังก์ชันสมาชิกอินพุต i_{L1}/i_{FS1} กำหนดค่าเชิงภาษาของฟังก์ชันสมาชิก 3 เซต ได้แก่ “Positive Small: PS”, “Positive Medium: PM” และ “Positive Large: PL” ส่วนฟังก์ชันสมาชิกเอาต์พุตสำหรับการตรวจจับความผิดปกติที่ S_1 คือสัญญาณความผิดปกติที่ S_1 (FD_1) จะใช้รูปร่างของฟังก์ชันสมาชิกเป็นค่าคงที่เส้นตรงโทนที่มี 3 ค่าประกอบด้วย “Negative: N”, “Zero: Z” และ “Positive: P” ดังรูปที่ 5.23 ซึ่งเป็นรูปแบบการอนุมานฟัซซี่แบบ Sugeno (Sugeno fuzzy inference)

ความสัมพันธ์ของอินพุต m_{iL1}/m_{FS1} และ i_{L1}/i_{FS1} และเอาต์พุตคือ FD_1 สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5.2 การออกแบบกฎของฟัซซี่ระหว่างตัวแปรทั้ง 3 มีดังนี้

1 st	IF	$m_{iL1}/m_{FS1} = N$	AND	$i_{L1}/i_{FS1} = PS$	THEN	$FD_1 = P$
2 nd	IF	$m_{iL1}/m_{FS1} = N$	AND	$i_{L1}/i_{FS1} = PM$	THEN	$FD_1 = Z$
3 rd	IF	$m_{iL1}/m_{FS1} = N$	AND	$i_{L1}/i_{FS1} = PL$	THEN	$FD_1 = Z$
4 th	IF	$m_{iL1}/m_{FS1} = Z$	AND	$i_{L1}/i_{FS1} = PS$	THEN	$FD_1 = P$
5 th	IF	$m_{iL1}/m_{FS1} = Z$	AND	$i_{L1}/i_{FS1} = PM$	THEN	$FD_1 = Z$
6 th	IF	$m_{iL1}/m_{FS1} = Z$	AND	$i_{L1}/i_{FS1} = PL$	THEN	$FD_1 = Z$
7 th	IF	$m_{iL1}/m_{FS1} = P$	AND	$i_{L1}/i_{FS1} = PS$	THEN	$FD_1 = Z$
8 th	IF	$m_{iL1}/m_{FS1} = P$	AND	$i_{L1}/i_{FS1} = PM$	THEN	$FD_1 = Z$
9 th	IF	$m_{iL1}/m_{FS1} = P$	AND	$i_{L1}/i_{FS1} = PL$	THEN	$FD_1 = N$

ตารางที่ 5.2 หน่วยความจำฟัซซี่สัมพันธ์ของการตรวจจับความผิดปกติของสวิตช์ตัวที่ 1

$m_{iL1}/m_{FS1} \backslash i_{L1}/i_{FS1}$	N	Z	P
PS	P	P	Z
PM	Z	Z	Z
PL	Z	Z	N

จากหน่วยความจำฟิสิกส์สัมพันธ์ที่ใช้ตรวจจับความผิดปกติของสวิตช์ตัวที่ 1 นั้น ค่าเอาต์พุต FD_1 ที่ได้จากการทำดีฟิสิกส์จะมีค่าอยู่ในช่วง -1 ถึง 1 โดยค่า FD_1 ที่เป็นลบ บ่งบอกถึงการทำงานของวงจรในสภาวะปกติ ในขณะที่ค่า FD_1 ที่เป็นบวก บ่งบอกถึงสภาวะที่เกิดความผิดปกติเพื่อให้การตรวจจับมีความถูกต้องและรวดเร็ว จึงได้กำหนดขอบเขตการตรวจจับความผิดปกติของเอาต์พุต FD_1 ไว้ที่ 0.8 กล่าวคือ หากค่า FD_1 น้อยกว่า 0.8 อาจทำให้การตรวจจับความผิดปกติเกิดความผิดพลาดในช่วงที่วงจรมีการเปลี่ยนจุดการทำงาน หากกำหนดค่า FD_1 ให้มากกว่า 0.8 จะส่งผลให้ระยะเวลาในการตรวจจับความผิดปกติยาวนานขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5.18 ซึ่งแสดงกระบวนการระบุสถานะความผิดปกติที่สวิตช์ S_1

จากการสังเกตพฤติกรรมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นภายใต้การควบคุมฟิสิกส์ที่พัฒนาขึ้นทั้งในสภาวะปกติและสภาวะเกิดความผิดปกติที่ S_1 สามารถออกแบบความสัมพันธ์ของอินพุตในการตรวจจับความผิดปกติแสดงในรูปของกฎทางฟิสิกส์ดังแสดงในตารางที่ 5.2 สามารถอธิบายตัวอย่างการตรวจจับความผิดปกติที่ S_1 ได้ดังนี้

กรณีที่ 1 m_{iL1}/m_{FS1} เป็นสมาชิกของเซตลบ ($m_{iL1}/m_{FS1} \in N$) ก็ต่อเมื่อ m_{iL} มีค่าน้อยกว่า -0.3 เท่าของ m_{FS1} กระบวนการฟิสิกส์ของ i_{L1} ณ เวลาใด ๆ พบว่ามีความเป็นไปได้ที่จะเข้าเงื่อนไขกฎฟิสิกส์ข้อที่ 1 ถึงกฎที่ 3 กระบวนการดังกล่าวสามารถอธิบายได้ดังนี้

- 1) กฎฟิสิกส์ข้อที่ 1 เมื่อ i_{L1}/i_{FS1} เป็นบวกค่าน้อยอยู่ในเซต PS หมายถึง i_{L1} ณ เวลาที่พิจารณามีค่าต่ำกว่า 0.3 เท่าของ i_{FS1} ดังนั้นตัวตรวจจับความผิดปกติต้องสร้าง FD_1 ที่เป็นบวก (P) จะแสดงถึงการทำงานของวงจรในสภาวะนี้เกิดความผิดปกติที่ S_1
- 2) กฎฟิสิกส์ข้อที่ 2 เมื่อ i_{L1}/i_{FS1} มีค่าบวกปานกลางอยู่ในเซต PM หมายถึง i_{L1} ณ เวลาที่พิจารณามีค่าอยู่ในช่วง 0.1 ถึง 1.9 เท่าของ i_{FS1} ดังนั้นตัวตรวจจับความผิดปกติต้องสร้าง FD_1 ที่เป็นศูนย์ (Z) จะแสดงถึงการทำงานของวงจรในสภาวะนี้เป็นการทำงานปกติ
- 3) กฎฟิสิกส์ข้อที่ 3 เมื่อ i_{L1}/i_{FS1} มีค่าบวกปานกลางอยู่ในเซต PM หมายถึง i_{L1} ณ เวลาที่พิจารณามีค่าเกิน 1.7 เท่าของ i_{FS1} ดังนั้นตัวตรวจจับความผิดปกติต้องสร้าง FD_1 ที่เป็นศูนย์ (Z) ซึ่งแสดงถึงสภาวะการทำงานของวงจรแบบปกติ

กรณีที่ 2 m_{iL1}/m_{FS1} เป็นสมาชิกของเซตศูนย์ ($m_{iL1}/m_{FS1} \in Z$) ก็ต่อเมื่อ m_{iL} มีค่าอยู่ในช่วง -0.5 ถึง 0.5 เท่าของ m_{FS1} กระบวนการฟิสิกส์ของ i_{L1} ณ เวลาใด ๆ พบว่ามีความเป็นไปได้ที่จะเข้าเงื่อนไขกฎฟิสิกส์ข้อที่ 4 ถึงกฎที่ 6 กระบวนการดังกล่าวสามารถอธิบายได้ดังนี้

- 4) กฎฟิชชีข้อที่ 4 เมื่อ i_{L1}/i_{FS1} มีค่าบวกลittleน้อยอยู่ในเซต PS หมายถึง i_{L1} ณ เวลาที่พิจารณามีค่าต่ำกว่า 0.3 เท่าของ i_{FS1} ดังนั้นตัวตรวจจับความผิดปกติต้องสร้าง FD_1 ที่เป็นบวก (P) จะแสดงถึงการทำงานของวงจรในสภาวะนี้เกิดความผิดปกติที่ S_1
- 5) กฎฟิชชีข้อที่ 5 เมื่อ i_{L1}/i_{FS1} มีค่าบวกปานกลางอยู่ในเซต PM หมายถึง i_{L1} ณ เวลาที่พิจารณามีค่าอยู่ในช่วง 0.1 ถึง 1.9 เท่าของ i_{FS1} ดังนั้นตัวตรวจจับความผิดปกติต้องสร้าง FD_1 ที่เป็นศูนย์ (Z) จะแสดงถึงการทำงานของวงจรในสภาวะนี้เป็นการทำงานปกติ
- 6) กฎฟิชชีข้อที่ 6 เมื่อ i_{L1}/i_{FS1} มีค่าบวกปานกลางอยู่ในเซต PM หมายถึง i_{L1} ณ เวลาที่พิจารณามีค่าเกิน 1.7 เท่าของ i_{FS1} ดังนั้นตัวตรวจจับความผิดปกติต้องสร้าง FD_1 ที่เป็นศูนย์ (Z) ซึ่งแสดงถึงสภาวะการทำงานของวงจรแบบปกติ

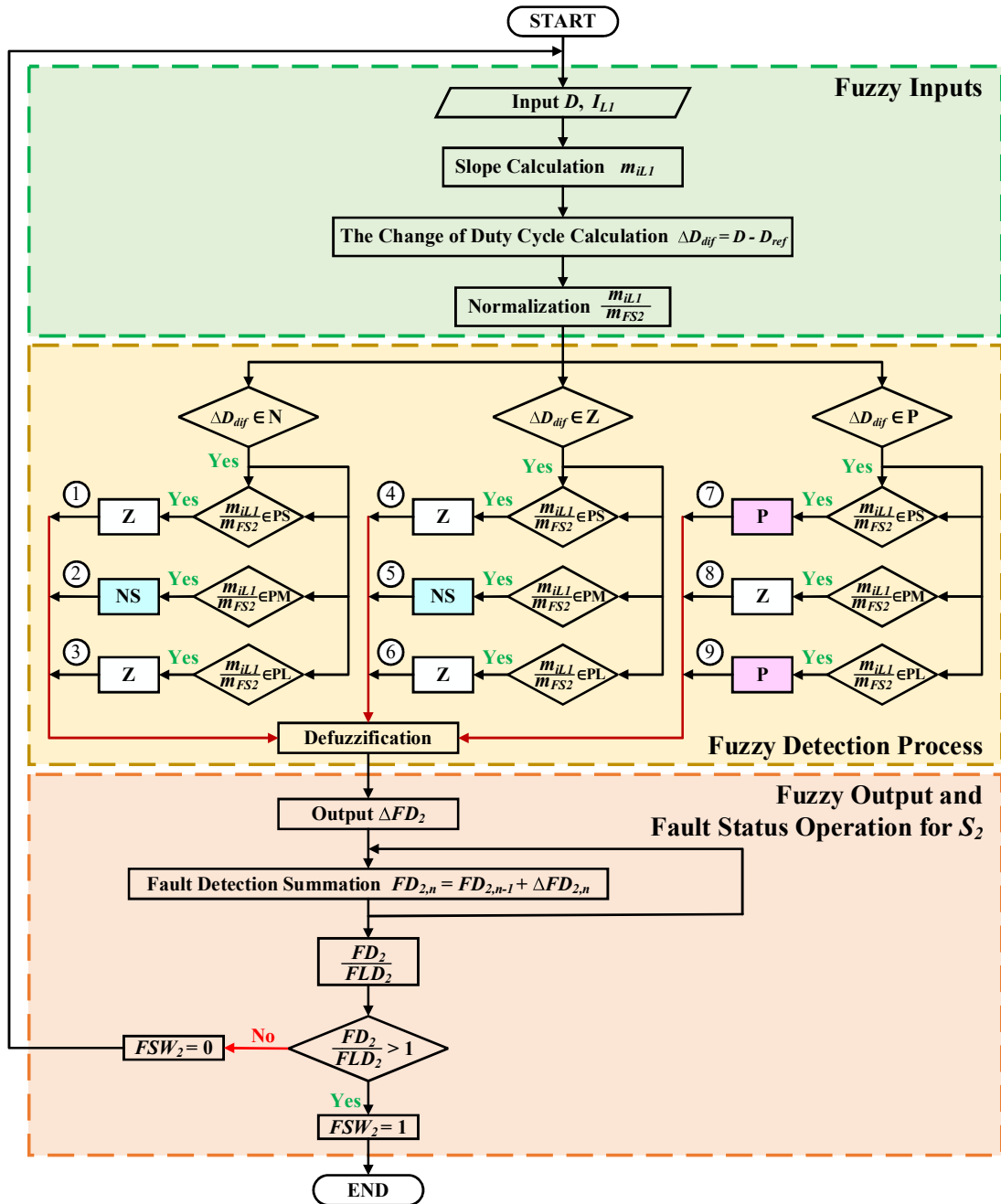
กรณีที่ 3 m_{iL1}/m_{FS1} เป็นสมาชิกของเซตศูนย์ ($m_{iL1}/m_{FS1} \in Z$) ก็ต่อเมื่อ m_{iL1} มีค่ามากกว่า 0.3 เท่าของ m_{FS1} กระบวนการฟิชชีของ i_{L1} ณ เวลาใด ๆ พบว่ามีความเป็นไปได้ที่จะเข้าเงื่อนไขกฎฟิชชีข้อที่ 7 ถึงข้อที่ 9 กระบวนการดังกล่าวสามารถอธิบายได้ดังนี้

- 7) กฎฟิชชีข้อที่ 4 เมื่อ i_{L1}/i_{FS1} มีค่าบวกลittleน้อยอยู่ในเซต PS หมายถึง i_{L1} ณ เวลาที่พิจารณามีค่าต่ำกว่า 0.3 เท่าของ i_{FS1} ดังนั้นตัวตรวจจับความผิดปกติต้องสร้าง FD_1 ที่เป็นบวก (P) ซึ่งแสดงถึงสภาวะการทำงานของวงจรแบบปกติ
- 8) กฎฟิชชีข้อที่ 5 เมื่อ i_{L1}/i_{FS1} มีค่าบวกปานกลางอยู่ในเซต PM หมายถึง i_{L1} ณ เวลาที่พิจารณามีค่าอยู่ในช่วง 0.1 ถึง 1.9 เท่าของ i_{FS1} ดังนั้นตัวตรวจจับความผิดปกติต้องสร้าง FD_1 ที่เป็นศูนย์ (Z) จะแสดงถึงการทำงานของวงจรในสภาวะนี้เป็นการทำงานปกติ
- 9) กฎฟิชชีข้อที่ 6 เมื่อ i_{L1}/i_{FS1} มีค่าบวกปานกลางอยู่ในเซต PM หมายถึง i_{L1} ณ เวลาที่พิจารณามีค่าเกิน 1.7 เท่าของ i_{FS1} ดังนั้นตัวตรวจจับความผิดปกติต้องสร้าง FD_1 ที่เป็นศูนย์ (Z) ซึ่งแสดงถึงสภาวะการทำงานของวงจรแบบปกติ

5.3.2 การตรวจจับความผิดปกติที่ S_2

จากการสังเกตพฤติกรรมของวงจรเมื่อการเกิดความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_2 พบว่าสัญญาณ D และ m_{iL1} มีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด จึงพิจารณาค่าดังกล่าวเป็นอินพุตสำหรับการตรวจจับความผิดปกติที่ S_2 โดยแผนภาพวิธีการตรวจจับความผิดปกติที่ S_2 แสดงดังรูปที่ 5.24 โดยค่าสัญญาณความผิดปกติที่ S_2 (FD_2) ในปัจจุบัน จะได้จากการนำค่าสัญญาณความผิดปกติที่ S_2

ก่อนหน้า (FD_{2,n-1}) บวกกับสัญญาณการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาดที่สวิตช์ตัวที่ 2 (ΔFD_2) ที่สร้างขึ้นในขณะนั้น ๆ

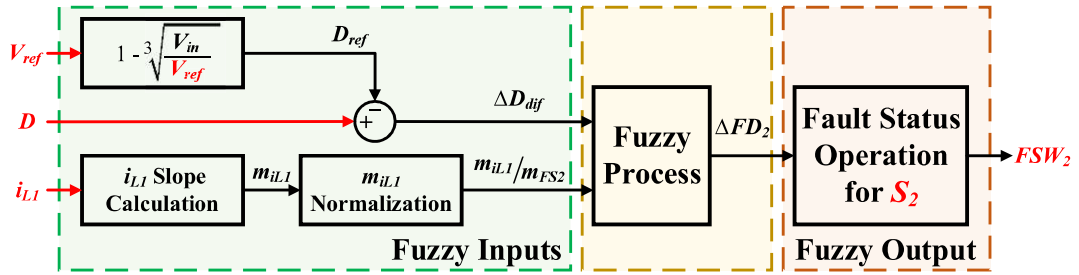


รูปที่ 5.24 แผนภาพวิธีการตรวจจับความผิดพลาดที่ S₂

จากแผนภาพวิธีการตรวจจับความผิดพลาดที่ S₂ ที่แสดงดังรูปที่ 5.15 อินพุตของการตรวจจับความผิดพลาดที่ S₂ ประกอบด้วย ได้แก่ สัญญาณค่าผลต่างของค่าวัฏจักรหน้าที่ของสวิตช์

(ΔD_{dif}) และ ความชันของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่ 1 (m_{iL1}) ที่ถูกปรับค่าสเกลในกระบวนการนอร์มัลไลซ์ด้วยค่าความชันของกระแสดขณะเกิดความผิดปกติที่ S_2 (m_{FS2}) ซึ่งจะถูกลำถึงในขั้นถัดไป

อินพุตค่าแรกก่อนเข้ากระบวนการฟัซซีเป็น ΔD_{dif} ดังสมการที่ (5.3) โดย D_{ref} เป็นค่าวัฏจักรหน้าที่อ้างอิงของสวิตช์ ซึ่งได้จากการวิเคราะห์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นในบทยที่ 3 ในสภาวะปกติ (Healthy mode) โดยที่ V_O เท่ากับ V_{ref} และ V_{in} มีขนาดประมาณ 20V จากอัตราขยายแรงดันของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นสมการที่ (3.26) สามารถคำนวณ D_{ref} ได้ดังสมการที่ (5.4)



รูปที่ 5.25 โครงสร้างของการตรวจจับความผิดปกติที่ S_2

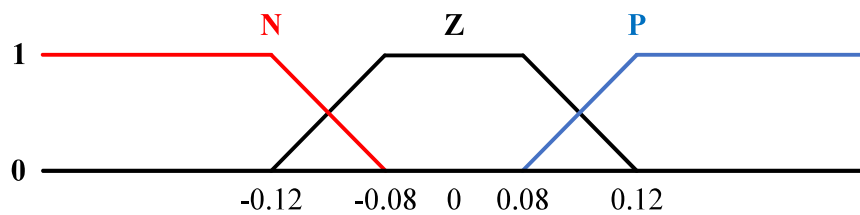
$$\Delta D_{dif} = D - D_{ref} \quad (5.3)$$

$$D_{ref} = 1 - \sqrt[3]{\frac{V_{in}}{V_{ref}}} \quad (5.4)$$

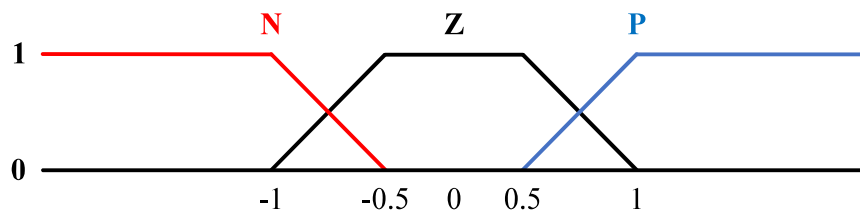
อินพุตค่าที่สองเริ่มจากกระบวนการคำนวณค่าความชันของ i_{L1} ให้ได้ค่า m_{iL1} จากนั้นจะเข้าสู่กระบวนการ m_{iL1} Normalization เพื่อปรับค่าสเกลด้วย m_{FS2} ที่ได้จากการศึกษาพฤติกรรมของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นภายใต้การควบคุมฟัซซีที่พัฒนาขึ้นในสภาวะปกติ โดยที่ m_{iL1} มีค่าการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง $-100A/s$ ถึง $100A/s$ ดังนั้นจึงกำหนดค่า m_{FS2} เป็นสองเท่าของ m_{ref} สมการที่ (4.3) ซึ่งได้จากการออกแบบตัวควบคุมฟัซซีสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นในบทยที่ 4 ดังนั้น m_{FS2} คำนวณได้ดังสมการที่ (5.5)

$$m_{FS2} = 2m_{ref} \quad (5.5)$$

ดังนั้นหากกำหนดให้แรงดัน V_{ref} ไว้ที่ 400V และพิจารณาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมฟัซซีที่พัฒนาขึ้นในตารางที่ 4.3 จะสามารถคำนวณค่า D_{ref} และ m_{FS2} เท่ากับ 0.635 และ 200A/s ตามลำดับ และจากผลตอบสนองการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้น เมื่อเกิดความผิดปกติที่ S_2 สามารถพิจารณาฟังก์ชันสมาชิกระหว่างฟัซซีเซตของค่า ΔD_{dif} และ m_{IL1} ที่ถูกปรับค่าให้เป็นบรรทัดฐาน (Normalization) อยู่ในขอบเขต ดังรูปที่ 5.26 และ 5.27 ตามลำดับ ซึ่งได้จากการสังเกตพฤติกรรมการทำงานของวงจร

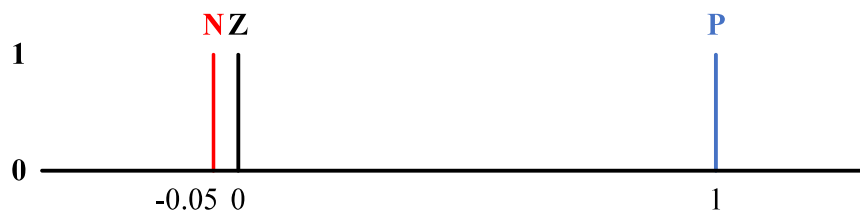


รูปที่ 5.26 ฟังก์ชันสมาชิกอินพุต ΔD_{dif}



รูปที่ 5.27 ฟังก์ชันสมาชิกอินพุต m_{IL1}/m_{FS2}

ฟังก์ชันสมาชิกอินพุตทั้งสองจะใช้รูปร่างของฟังก์ชันสมาชิกเป็นแบบเหลี่ยมคางหมู ฟังก์ชันสมาชิก ΔD_{dif} และ m_{IL1}/m_{FS2} กำหนดค่าเชิงภาษาของฟังก์ชันสมาชิก 3 เซต ได้แก่ “Negative: N”, “Zero: Z” และ “Positive: P” ส่วนฟังก์ชันสมาชิกเอาต์พุตสำหรับการตรวจจับความผิดปกติที่ S_2 คือสัญญาณการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดปกติที่สวิตช์ตัวที่ 2 (ΔFD_2) จะใช้รูปร่างของฟังก์ชันสมาชิกเป็นค่าคงที่เส้นตรงโทที่มี 3 ค่าประกอบด้วย “Negative Small: NS”, “Zero: Z” และ “Positive: P” ดังรูปที่ 5.28 ซึ่งเป็นรูปแบบการอนุมานฟัซซีแบบ Sugeno (Sugeno fuzzy inference)



รูปที่ 5.28 ฟังก์ชันสมาชิกการเปลี่ยนแปลงการตรวจจับความผิดปกติที่ S_2 (ΔFD_2)

จากค่าเชิงภาษาของฟังก์ชันสมาชิก ΔFD_2 ดังแสดงในรูปที่ 5.28 ได้กำหนดค่าเชิงภาษาของ Negative Small ที่ค่า -0.05 ซึ่งไม่สมมาตรกับ Positive ที่ค่า 1 นั้น จากการสังเกตพฤติกรรมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นภายใต้การควบคุมฟัซซีที่พัฒนาขึ้น พบว่าผลตอบสนองของการทำงานของวงจรบางกรณีเมื่อเปลี่ยนจุดการทำงานของวงจรคล้ายคลึงกับการทำงานของวงจรเมื่อเกิดความผิดพลาดที่ S_2 ซึ่งจะถูกกล่าวถึงในขั้นถัดไปในหัวข้อกระบวนการแสดงสถานะความผิดพลาดที่ S_2

ความสัมพันธ์ของอินพุต ΔD_{dif} และ m_{iL1}/m_{FS2} และเอาต์พุต ΔFD_2 สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5.3 การออกแบบกฎฟัซซีเป็น 9 กฎมีดังนี้

1 st	IF $\Delta D_{dif} = N$ AND $m_{iL1}/m_{FS2} = N$ THEN $\Delta FD_2 = Z$
2 nd	IF $\Delta D_{dif} = N$ AND $m_{iL1}/m_{FS2} = Z$ THEN $\Delta FD_2 = NS$
3 rd	IF $\Delta D_{dif} = N$ AND $m_{iL1}/m_{FS2} = P$ THEN $\Delta FD_2 = Z$
4 th	IF $\Delta D_{dif} = Z$ AND $m_{iL1}/m_{FS2} = N$ THEN $\Delta FD_2 = Z$
5 th	IF $\Delta D_{dif} = Z$ AND $m_{iL1}/m_{FS2} = Z$ THEN $\Delta FD_2 = NS$
6 th	IF $\Delta D_{dif} = Z$ AND $m_{iL1}/m_{FS2} = P$ THEN $\Delta FD_2 = Z$
7 th	IF $\Delta D_{dif} = P$ AND $m_{iL1}/m_{FS2} = N$ THEN $\Delta FD_2 = P$
8 th	IF $\Delta D_{dif} = P$ AND $m_{iL1}/m_{FS2} = Z$ THEN $\Delta FD_2 = Z$
9 th	IF $\Delta D_{dif} = P$ AND $m_{iL1}/m_{FS2} = P$ THEN $\Delta FD_2 = P$

ตารางที่ 5.3 หน่วยความจำฟัซซีสัมพันธ์ของการตรวจจับความผิดพลาดของสวิตช์ตัวที่ 2

$\Delta D_{dif} \backslash m_{iL1}/m_{FS2}$	N	Z	P
N	Z	Z	P
Z	NS	NS	Z
P	Z	Z	P

จากหน่วยความจำฟัซซีสัมพันธ์ของการตรวจจับความผิดพลาดของสวิตช์ตัวที่ 2 ข้างต้น เอาต์พุต ΔFD_2 ที่ได้จากการทำดีฟัซซีมีค่าอยู่ในช่วง -0.05 ถึง 1 โดยหากค่า ΔFD_2 ติดลบ จะแสดงถึงการทำงานของวงจรในสภาวะปกติ แต่หากค่า ΔFD_2 เป็นบวกจะแสดงถึงการทำงานของวงจรในสภาวะเกิดความผิดพลาดที่ S_2 การวิเคราะห์พฤติกรรมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า

แบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น ทำให้สามารถออกแบบกระบวนการทางฟิสิกส์เพื่อตรวจจับความผิดพร่องที่ S_2 ได้ โดยกำหนดความสัมพันธ์ของอินพุตที่ใช้ในการตรวจจับความผิดพร่องในรูปของกฎฟิสิกส์ ซึ่งสามารถแสดงในรูปแบบของหน่วยความจำฟิสิกส์สัมพันธ์ตามที่ปรากฏในตารางที่ 5.3 ตัวอย่างการตรวจจับความผิดพร่องที่ S_2 สามารถอธิบายได้ดังนี้

กรณีที่ 1 ΔD_{dif} เป็นสมาชิกของเซตลบ ($\Delta D_{dif} \in N$) ก็ต่อเมื่อ ΔD_{dif} มีค่าน้อยกว่า -0.08 กระบวนการฟิสิกส์ของ m_{iL1} ณ เวลาใด ๆ พบว่ามีความเป็นไปได้ที่จะเข้าเงื่อนไขกฎฟิสิกส์ข้อที่ 1 ถึงกฎที่ 3 กระบวนการดังกล่าวสามารถอธิบายได้ดังนี้

- 1) กฎฟิสิกส์ข้อที่ 1 เมื่อ m_{iL1}/m_{FS2} เป็นบวกอยู่ในเซต P หมายถึง m_{iL1} ณ เวลาที่พิจารณามีค่าต่ำกว่า -0.5 เท่าของ m_{FS2} ดังนั้นตัวตรวจจับความผิดพร่องต้องสร้าง ΔFD_2 ที่เป็นศูนย์ (Z) จะแสดงถึงการทำงานของวงจรในสภาวะนี้เป็นการทำงานปกติ
- 2) กฎฟิสิกส์ข้อที่ 2 เมื่อ m_{iL1}/m_{FS2} มีค่าเป็นศูนย์อยู่ในเซต Z หมายถึง m_{iL1} ณ เวลาที่พิจารณามีค่าอยู่ในช่วง $-m_{FS2}$ ถึง m_{FS2} ดังนั้นตัวตรวจจับความผิดพร่องต้องสร้าง ΔFD_2 ที่เป็นลบน้อย (NS) จะแสดงถึงการทำงานของวงจรในสภาวะนี้เป็นการทำงานปกติ
- 3) กฎฟิสิกส์ข้อที่ 3 เมื่อ m_{iL1}/m_{FS2} มีค่าบวกอยู่ในเซต P หมายถึง m_{iL1} ณ เวลาที่พิจารณามีค่าเกิน $0.5m_{FS2}$ ดังนั้นตัวตรวจจับความผิดพร่องต้องสร้าง ΔFD_2 ที่เป็นศูนย์ (Z) จะแสดงถึงการทำงานของวงจรในสภาวะนี้เป็นการทำงานปกติ

กรณีที่ 2 ΔD_{dif} เป็นสมาชิกของเซตศูนย์ ($\Delta D_{dif} \in Z$) ก็ต่อเมื่อ ΔD_{dif} มีค่าอยู่ในช่วง -0.12 ถึง 0.12 กระบวนการฟิสิกส์ของ m_{iL1} ณ เวลาใด ๆ พบว่ามีความเป็นไปได้ที่จะเข้าเงื่อนไขกฎฟิสิกส์ข้อที่ 4 ถึงกฎที่ 6 กระบวนการดังกล่าวสามารถอธิบายได้ดังนี้

- 4) กฎฟิสิกส์ข้อที่ 4 เมื่อ m_{iL1}/m_{FS2} เป็นบวกอยู่ในเซต P หมายถึง m_{iL1} ณ เวลาที่พิจารณามีค่าต่ำกว่า -0.5 เท่าของ m_{FS2} ดังนั้นตัวตรวจจับความผิดพร่องต้องสร้าง ΔFD_2 ที่เป็นศูนย์ (Z) จะแสดงถึงการทำงานของวงจรในสภาวะนี้เป็นการทำงานปกติ
- 5) กฎฟิสิกส์ข้อที่ 5 เมื่อ m_{iL1}/m_{FS2} มีค่าเป็นศูนย์อยู่ในเซต Z หมายถึง m_{iL1} ณ เวลาที่พิจารณามีค่าอยู่ในช่วง $-m_{FS2}$ ถึง m_{FS2} ดังนั้นตัวตรวจจับความผิดพร่องต้องสร้าง ΔFD_2 ที่เป็นลบน้อย (NS) จะแสดงถึงการทำงานของวงจรในสภาวะนี้เป็นการทำงานปกติ

6) กฎฟิสิกส์ข้อที่ 6 เมื่อ m_{IL1}/m_{FS2} มีค่าบวกอยู่ในเซต P หมายถึง m_{IL1} ณ เวลาที่พิจารณา มีค่าเกิน $0.5m_{FS2}$ ดังนั้นตัวตรวจจับความผิดพร่องต้องสร้าง ΔFD_2 ที่เป็นศูนย์ (Z) จะแสดงถึงการทำงานของวงจรในสภาวะนี้เป็นการทำงานปกติ

กรณีที่ 3 ΔD_{dif} เป็นสมาชิกของเซตศูนย์ ($\Delta D_{dif} \in Z$) ก็ต่อเมื่อ ΔD_{dif} มีค่ามากกว่า 0.08 กระบวนการฟิสิกส์ของ m_{IL1} ณ เวลาใด ๆ พบว่ามีความเป็นไปได้ที่จะเข้าเงื่อนไขกฎฟิสิกส์ข้อที่ 7 ถึงกฎที่ 9 กระบวนการดังกล่าวสามารถอธิบายได้ดังนี้

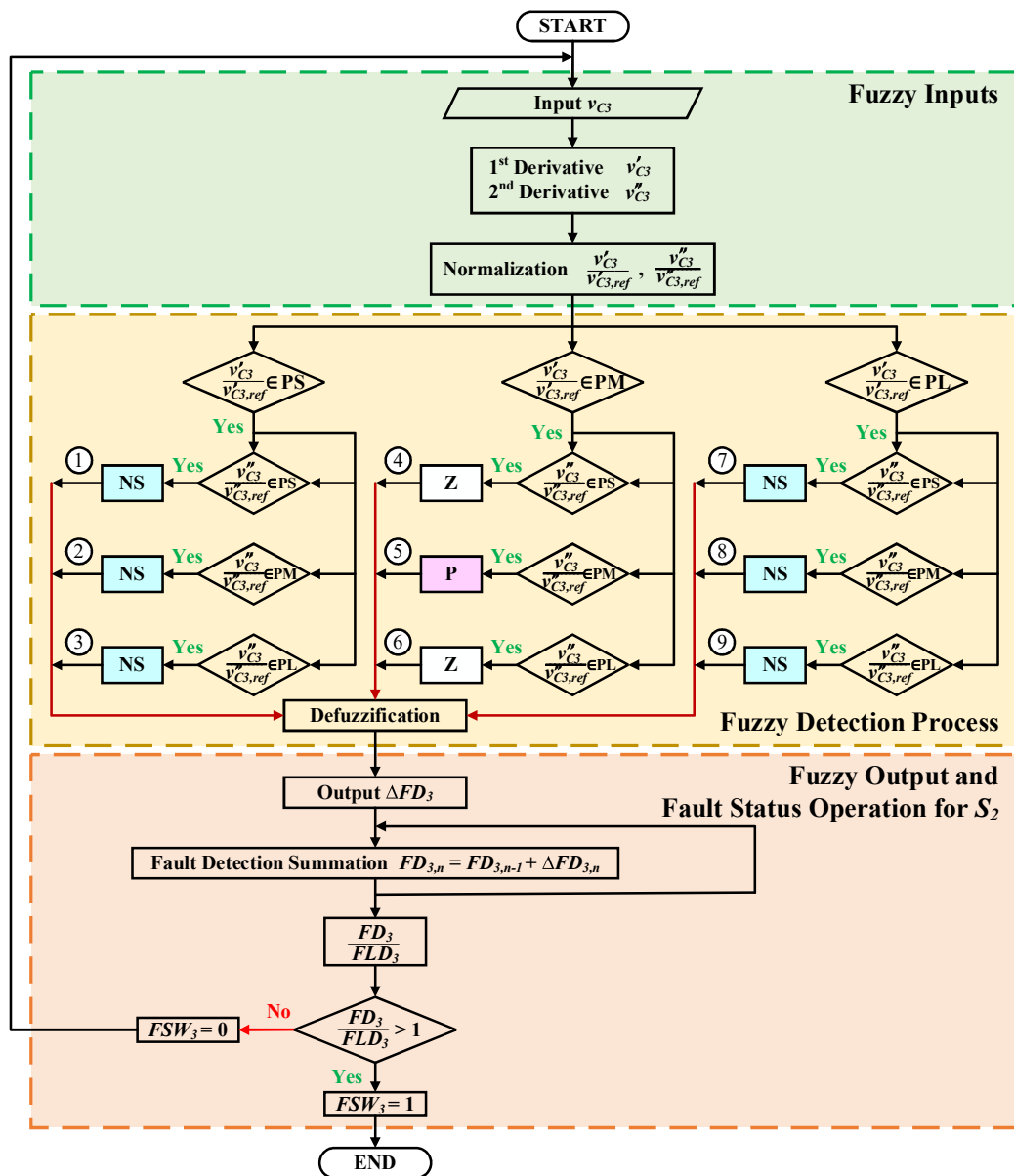
- 7) กฎฟิสิกส์ข้อที่ 7 เมื่อ m_{IL1}/m_{FS2} เป็นบวกอยู่ในเซต P หมายถึง m_{IL1} ณ เวลาที่พิจารณา มีค่าต่ำกว่า -0.5 เท่าของ m_{FS2} ดังนั้นตัวตรวจจับความผิดพร่องต้องสร้าง ΔFD_2 ที่เป็นบวก (P) จะแสดงถึงการทำงานของวงจรในสภาวะนี้เกิดความผิดพร่องที่ S_2
- 8) กฎฟิสิกส์ข้อที่ 8 เมื่อ m_{IL1}/m_{FS2} มีค่าเป็นศูนย์อยู่ในเซต Z หมายถึง m_{IL1} ณ เวลาที่พิจารณา มีค่าอยู่ในช่วง $-m_{FS2}$ ถึง m_{FS2} ดังนั้นตัวตรวจจับความผิดพร่องต้องสร้าง ΔFD_2 ที่เป็นลบน้อย (NS) จะแสดงถึงการทำงานของวงจรในสภาวะนี้เป็นการทำงานปกติ
- 9) กฎฟิสิกส์ข้อที่ 9 เมื่อ m_{IL1}/m_{FS2} มีค่าบวกอยู่ในเซต P หมายถึง m_{IL1} ณ เวลาที่พิจารณา มีค่าเกิน $0.5m_{FS2}$ ดังนั้นตัวตรวจจับความผิดพร่องต้องสร้าง ΔFD_2 ที่เป็นบวก (P) จะแสดงถึงการทำงานของวงจรในสภาวะนี้เกิดความผิดพร่องที่ S_2

กระบวนการแสดงสถานะการผิดพร่องที่ S_2 จะแสดงสถานะการทำงานปกติ เมื่อ FWS_2 เป็น 0 โดยเมื่อเกิดความผิดพร่องที่ S_2 สถานะ FWS_2 จะเป็น 1 จะเห็นว่ากระบวนการแสดงสถานะการผิดพร่องที่ S_2 มีความแตกต่างจากกระบวนการแสดงสถานะการผิดพร่องที่ S_1 เนื่องจากพฤติกรรมการทำงานของวงจรกรณีเกิดการเปลี่ยนแปลงแรงดัน V_{in} จะทำให้ m_{IL1} จะมีค่าการเปลี่ยนแปลงเกินช่วง $-m_{FS2}$ ถึง m_{FS2} ในระยะเวลาสั้น ๆ เท่านั้นดังที่แสดงในภาพขยายพฤติกรรมการทำงานของวงจรกรณีเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตรูปที่ 5.3 และ 5.4 ผลตอบสนองดังกล่าวตรงกับกฎฟิสิกส์ของการตรวจจับความผิดพร่องที่ S_2 ข้อที่ 7 และ 9 ที่ให้ ΔFD_2 เป็นบวก (P) จึงใช้วิธีการบวกสะสมค่าของ ΔFD_2 เข้าช่วยเพื่อให้การตรวจจับความผิดพร่องที่ S_2 มีความถูกต้องยิ่งขึ้น ค่าสัญญาณความผิดพร่องที่ S_2 (FD_2) สามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (5.6)

$$FD_{2,n} = FD_{2,n-1} + \Delta FD_{2,n} \quad (5.6)$$

จากสมการคำนวณหาเอาต์พุต FD_2 ที่กล่าวมาหากมีค่าเป็นบวกจะแสดงถึงการทำงานของวงจรในที่มีความเป็นไปได้ที่จะเกิดสถานะเกิดความผิดพลาด เพื่อให้ได้การตรวจจับที่ถูกต้อง จึงกำหนดขอบเขตการตรวจจับความผิดพลาดของเอาต์พุต FD_2 อยู่ในช่วงศูนย์ถึงค่าจำกัดการตรวจจับความผิดพลาดที่ S_2 (FLD_2) เพื่อหลีกเลี่ยงการตรวจจับผิดพลาดเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงจุดการทำงาน จึงทำการศึกษาพฤติกรรมการทำงานของวงจรภายใต้การเปลี่ยนแปลงจุดการทำงาน เพื่อให้ได้ค่า FLD_2 ที่เหมาะสม ซึ่งจะกล่าวในเนื้อหาถัดไป ดังนั้นเพื่อให้ได้การตรวจจับที่ถูกต้องกระบวนการแสดงสถานะการผิดพลาดจะแสดงสถานะ FSW_2 เป็น 1 ก็ต่อเมื่อค่าสัญญาณ FD_2 หาดด้วย FLD_2 มีค่ามากกว่า 1

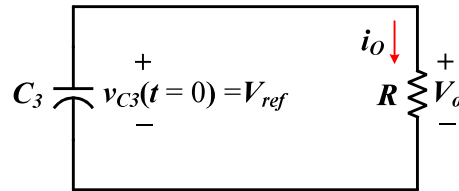
5.3.3 การตรวจจับความผิดพลาดที่ S_3



รูปที่ 5.29 แผนภาพวิธีการตรวจจับความผิดพลาดที่ S_3

จากการสังเกตพฤติกรรมการเกิดความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_3 จะเห็นได้ว่า สัญญาณแรงดัน v_{C3} มีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด จึงพิจารณาค่าดังกล่าวเป็นอินพุตสำหรับการตรวจจับความผิดพลาดที่ S_3 โดยแผนภาพวิธีการตรวจจับความผิดพลาดที่ S_3 แสดงดังรูปที่ 5.29 โดยที่ค่าสัญญาณความผิดพลาดที่ S_3 (FD_3) ในปัจจุบัน จะได้จากการนำค่าสัญญาณความผิดพลาดที่ S_3 ก่อนหน้านั้น ($FD_{3,n-1}$) บวกกับสัญญาณการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาดที่สวิตช์ตัวที่ 3 (ΔFD_3) ที่สร้างขึ้นในขณะนั้น ๆ

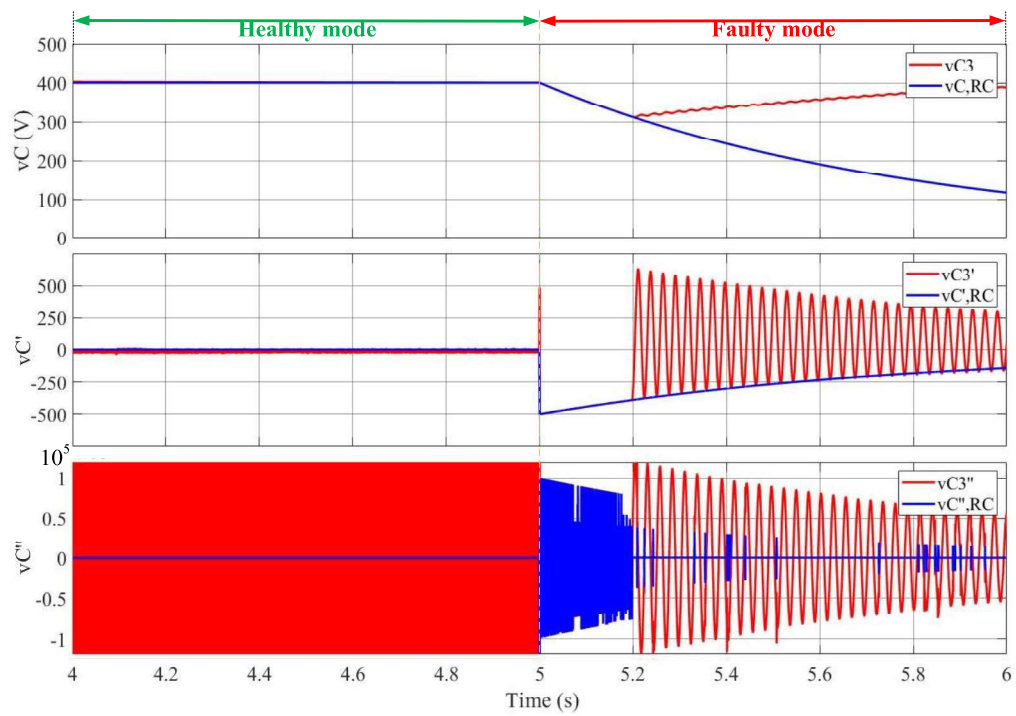
ผลตอบสนองของ v_{C3} เมื่อเกิดความผิดพลาดที่ S_3 พบว่ามีค่าลดลงจากการคายประจุให้กับ R เนื่องจาก i_{L3} มีค่าเป็น 0A ทันทีที่เกิดความผิดพลาด ซึ่งจะได้อะจรสมมูลเมื่อเกิดความผิดพลาดที่ S_3 ที่มีลักษณะคล้ายกับวงจร RC ที่มีแรงดันเริ่มต้นเท่ากับแรงดันอ้างอิง ดังแสดงในรูปที่ 5.30 ดังนั้นจะสามารถพิจารณา v_{C3} เมื่อเกิดความผิดพลาดที่ S_3 ได้จากสมการที่ (5.7)



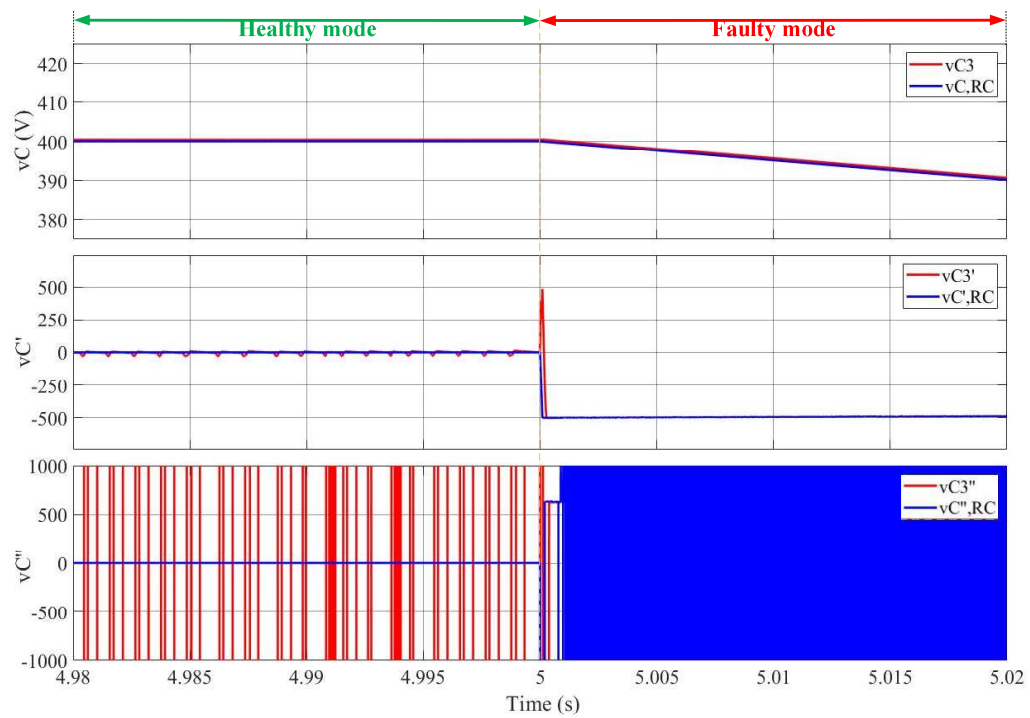
รูปที่ 5.30 วงจรสมมูลเมื่อเกิดความผิดพลาดที่ S_3

$$v_{C3} \ t = V_{ref} e^{-t/RC_3} \quad (5.7)$$

การจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นภายใต้ตัวควบคุมฟัซซีที่พัฒนาขึ้นเมื่อเกิดความผิดพลาดที่ S_3 เปรียบเทียบกับวงจร RC เมื่อ C_3 คายประจุให้โหลด R แสดงดังรูปที่ 5.31 โดยเกิดความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_3 ณ วินาทีที่ 5 จะเห็นได้ว่าแรงดัน v_{C3} มีค่าลดลงจากการคายประจุให้กับ R และมีผลตอบสนองเหมือนกับวงจร RC หลังจากนั้น ณ วินาทีที่ 5.2 แรงดัน v_{C3} มีค่าเพิ่มขึ้นเข้าหา V_{ref} เนื่องจากตัวควบคุมฟัซซีพยายามควบคุมแรงดันให้ได้ตามต้องการโดยอาศัยสวิตช์สองตัวที่เหลือ ซึ่งยังคงทำงานได้ตามปกติ ส่วนค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งและค่าอนุพันธ์อันดับสองของ v_{C3} มีผลตอบสนองที่คล้ายกันในช่วงเวลาวินาทีที่ 5 ถึง 5.02



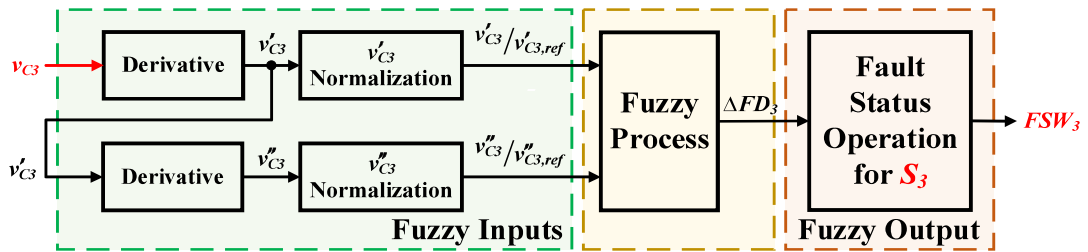
รูปที่ 5.31 ผลการเปรียบเทียบพฤติกรรมการทำงานของวงจรกรณีเกิดความผิดปกติที่ S_3 และวงจร RC



รูปที่ 5.31 ภาพขยายผลการเปรียบเทียบพฤติกรรมการทำงานของวงจรกรณีเกิดความผิดปกติที่ S_3 และวงจร RC

รูปที่ 5.32 แสดงภาพขยายเพื่อให้เห็นความแตกต่างระหว่างพฤติกรรมการทำงานของวงจรที่แสดงในรูปที่ 5.31 เมื่อพิจารณาพฤติกรรมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นหลังจากเกิดความผิดปกติที่ S_3 และวงจร RC พบว่าแรงดัน v_{C3} ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น และแรงดัน v_C ของวงจร RC มีค่าลดลงจาก 400V อย่างต่อเนื่อง โดยการคายประจุให้กับ R ส่วนอนุพันธ์อันดับหนึ่งของ v_{C3} และ v_C มีค่าเท่ากันประมาณ -500V/s และอนุพันธ์อันดับสองของ v_{C3} และ v_C มีค่าเท่ากันประมาณ 625V/s^2 ในช่วงเวลาสั้น ๆ หลังจากเกิดความผิดปกติ ดังนั้นจึงใช้ค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งและอันดับสองของ v_{C3} ในการตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_3

จากแผนภาพวิธีการตรวจจับความผิดปกติที่ S_3 ข้างต้น อินพุตของการตรวจจับความผิดปกติที่ S_3 ได้แก่ ค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งของ v_{C3} และค่าอนุพันธ์อันดับสองของ v_{C3} ที่ถูกปรับค่าสเกลในกระบวนการนอร์มัลไลซ์ด้วยค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งอ้างอิงของ v_{C3} ($V'_{C3,ref}$) และค่าอนุพันธ์อันดับสองอ้างอิงของ v_{C3} ($V''_{C3,ref}$) ตามลำดับ โดยที่สัญญาณ v_{C3} ได้จากการตรวจวัดค่าแรงดันที่ใช้ในกระบวนการควบคุมฟัซซีที่พัฒนาขึ้นจากนั้นทำการหาค่าอนุพันธ์ หรืออัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดัน v_{C3} ดังรูปที่ 5.33



รูปที่ 5.33 โครงสร้างของการตรวจจับความผิดปกติที่ S_3

จากโครงสร้างของการตรวจจับความผิดปกติที่ S_3 ดังแสดงในรูปที่ 5.33 จะเห็นได้ว่า อินพุตค่าแรกเริ่มจากกระบวนการอนุพันธ์ของ v_{C3} ให้ได้ค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งของ v_{C3} (v'_{C3}) หลังจากนั้นจะถูกปรับค่าสเกลด้วยค่า $V'_{C3,ref}$ ในกระบวนการนอร์มัลไลซ์ ที่ได้จากการพิจารณาวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นเมื่อเกิดความผิดปกติที่ S_3 และวงจร RC โดยที่ค่า $V'_{C3,ref}$ สามารถพิจารณาจากผลตอบสนองทางธรรมชาติของวงจร RC ดังแสดงในรูปที่ 5.30 เมื่อ V_{ref} คือแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ ณ เวลา $t = 0$ วินาที ดังสมการที่ (5.8)

$$v'_{C3} \ t = -\frac{V_{ref} e^{-t/RC}}{RC} \quad (5.8)$$

จะเห็นได้ว่า v'_{C3} แปรผันตามเวลา อย่างไรก็ตามการตรวจจับความผิดพร่องของสวิตช์ จำเป็นต้องมีความรวดเร็ว จึงพิจารณา $V'_{C3,ref}$ เมื่อเกิดความผิดพร่องทันที หรือช่วงเวลาที่ตัวเก็บประจุ เริ่มคายประจุ ดังนั้นจึงกำหนดให้ตัวแปรเวลามีค่าเป็นศูนย์ ($t = 0s$) ซึ่งจะสามารถวิเคราะห์หาขนาด $V'_{C3,ref}$ ได้ดังสมการที่ (5.9)

$$V'_{C3,ref} = -\frac{V_{ref}}{RC} \quad (5.9)$$

จากค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งของ v_{C3} (v'_{C3}) ที่ได้จากการอนุพันธ์ข้างต้น ในขณะเดียวกัน v'_{C3} จะเข้าสู่กระบวนการอนุพันธ์อีกครั้งให้ได้ค่าอนุพันธ์อันดับสองของ v_{C3} (v''_{C3}) หลังจากนั้นจะถูกปรับค่าสเกลด้วยค่า $V''_{C3,ref}$ ในกระบวนการนอร์มัลไลซ์ โดยที่ค่า $V'_{C3,ref}$ สามารถพิจารณาได้จากค่าอนุพันธ์ของ v'_{C3} ดังที่แสดงในสมการที่ (5.10)

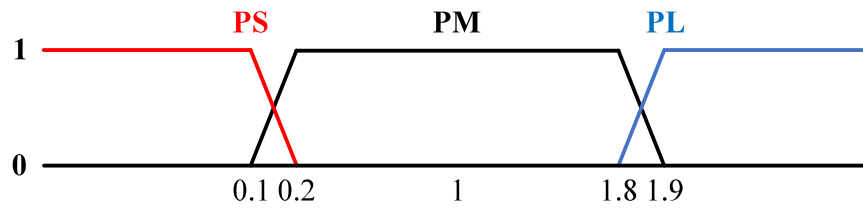
$$v''_{C3} \ t = \frac{V_{ref} e^{-t/RC}}{RC^2} \quad (5.10)$$

เช่นเดียวกันกับการพิจารณา $V'_{C3,ref}$ การตรวจจับความผิดพร่องของสวิตช์จำเป็นต้องมีความรวดเร็ว จึงพิจารณา $V''_{C3,ref}$ เมื่อเกิดความผิดพร่องทันที หรือช่วงเวลาที่ตัวเก็บประจุเริ่มคายประจุ ณ เวลาที่ 0 วินาที ซึ่งจะสามารถวิเคราะห์หาขนาด $V''_{C3,ref}$ ได้ดังสมการที่ (5.11)

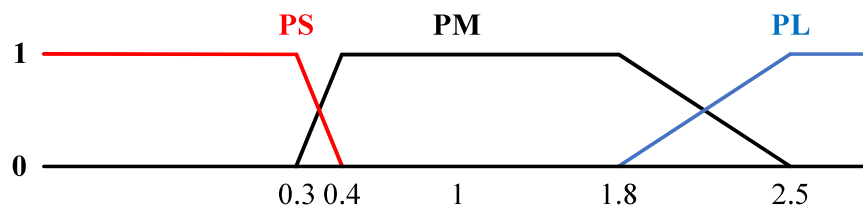
$$V''_{C3,ref} = \frac{V_{ref}}{RC^2} \quad (5.11)$$

ดังนั้นเมื่อพิจารณาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้กำหนดไว้ในตารางที่ 3.3 และ 3.4 ในบทที่ 3 จะสามารถคำนวณค่า $V'_{C3,ref}$ และ $V''_{C3,ref}$ เท่ากับ $-500V/s$ และ $625V/s^2$ ตามลำดับ

จากผลตอบสนองการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้น เมื่อเกิดความผิดพร่องที่ S_3 สามารถพิจารณาฟังก์ชันสมาชิกของค่า v'_{C3} และ v''_{C3} ที่ถูกปรับค่าให้เป็นบรรทัดฐาน (Normalization) ในขอบเขตเฉพาะที่ต้องการ ดังรูปที่ 5.34 และ 5.35 ตามลำดับ ซึ่งได้จากการสังเกตพฤติกรรมการทำงานของวงจร

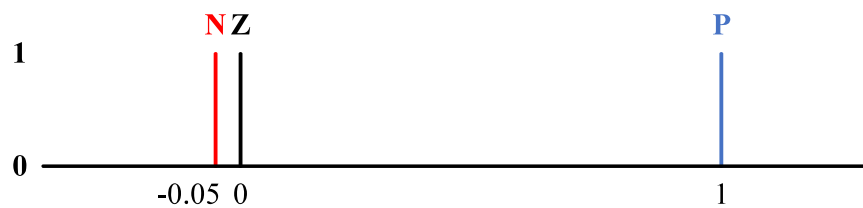


รูปที่ 5.34 ฟังก์ชันสมาชิกอินพุต $v'_{C3}/V'_{C3,ref}$



รูปที่ 5.34 ฟังก์ชันสมาชิกอินพุต $v''_{C3}/V''_{C3,ref}$

ฟังก์ชันสมาชิกอินพุตทั้งสองจะใช้รูปร่างของฟังก์ชันสมาชิกเป็นแบบเหลี่ยมคางหมู ฟังก์ชันสมาชิก $v'_{C3}/V'_{C3,ref}$ และ $v''_{C3}/V''_{C3,ref}$ กำหนดค่าเชิงภาษาของฟังก์ชันสมาชิก 3 เซต ได้แก่ “Positive Small: PS”, “Positive Medium: PM” และ “Positive Large: PL” ส่วนฟังก์ชันสมาชิก เอาต์พุตสำหรับการตรวจจับความผิดปกติของสวิตช์ตัวที่ 3 คือสัญญาณการเปลี่ยนแปลงความผิดปกติของสวิตช์ตัวที่ 3 (ΔFD_3) จะใช้รูปร่างของฟังก์ชันสมาชิกเป็นค่าคงที่เส้นตรงโทที่มี 3 ค่าประกอบด้วย “Negative Small: NS”, “Zero: Z” และ “Positive: P” ดังรูปที่ 5.36 ซึ่งเป็นรูปแบบการอนุมานฟัซซีแบบ Sugeno (Sugeno fuzzy inference)



รูปที่ 5.36 ฟังก์ชันสมาชิกการเปลี่ยนแปลงการตรวจจับความผิดปกติที่ S_3 (ΔFD_3)

เช่นเดียวกันกับการกำหนดค่าเชิงภาษาของฟังก์ชันสมาชิกเอาต์พุตสำหรับการตรวจจับความผิดปกติที่ S_2 จากการศึกษาพฤติกรรมของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นภายใต้ตัวควบคุมฟัซซีที่พัฒนาขึ้น พบว่าเมื่อเกิดความผิดปกติที่ S_3 วงจรจะมีการตอบสนองที่คล้ายคลึงกับการเปลี่ยนจุดการทำงานของวงจรในบางสถานการณ์ ดังนั้น จึงกำหนดค่า

เชิงภาษาของฟังก์ชันสมาชิก ΔFD_3 เป็นน้อยมาก (Negative Small) ไว้ที่ -0.05 โดยค่านี้ไม่ได้สมมาตรกับค่า Positive ดังที่แสดงในรูปที่ 5.36 ซึ่งจะถูกกล่าวถึงในขั้นถัดไปในหัวข้อกระบวนการแสดงสถานะความผิดพลาดที่ S_3

ความสัมพันธ์ของอินพุต $v'_{C3}/V'_{C3,ref}$ และ $v''_{C3}/V''_{C3,ref}$ และเอาต์พุต ΔFD_3 สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5.4 การออกแบบกฎของฟัซซีระหว่างตัวแปรทั้ง 3 มีดังนี้

- 1st IF $v'_{C3}/V'_{C3,ref}$ = PS AND $v''_{C3}/V''_{C3,ref}$ = PS THEN ΔFD_3 = N
- 2nd IF $v'_{C3}/V'_{C3,ref}$ = PS AND $v''_{C3}/V''_{C3,ref}$ = PM THEN ΔFD_3 = N
- 3rd IF $v'_{C3}/V'_{C3,ref}$ = PS AND $v''_{C3}/V''_{C3,ref}$ = PL THEN ΔFD_3 = N
- 4th IF $v'_{C3}/V'_{C3,ref}$ = PM AND $v''_{C3}/V''_{C3,ref}$ = PS THEN ΔFD_3 = Z
- 5th IF $v'_{C3}/V'_{C3,ref}$ = PM AND $v''_{C3}/V''_{C3,ref}$ = PM THEN ΔFD_3 = P
- 6th IF $v'_{C3}/V'_{C3,ref}$ = PM AND $v''_{C3}/V''_{C3,ref}$ = PL THEN ΔFD_3 = Z
- 7th IF $v'_{C3}/V'_{C3,ref}$ = PL AND $v''_{C3}/V''_{C3,ref}$ = PS THEN ΔFD_3 = N
- 8th IF $v'_{C3}/V'_{C3,ref}$ = PL AND $v''_{C3}/V''_{C3,ref}$ = PM THEN ΔFD_3 = N
- 9th IF $v'_{C3}/V'_{C3,ref}$ = PL AND $v''_{C3}/V''_{C3,ref}$ = PL THEN ΔFD_3 = N

ตารางที่ 5.4 หน่วยความจำฟัซซีสัมพันธ์ของการตรวจจับความผิดพลาดของสวิตช์ตัวที่ 3

$v'_{C3}/V'_{C3,ref}$ \ $v''_{C3}/V''_{C3,ref}$	PS	PM	PL
PS	NS	Z	NS
PM	NS	P	NS
PL	NS	Z	NS

จากการวิเคราะห์ผลลัพธ์ของฟังก์ชันสมาชิก ΔFD_3 จะเห็นได้ว่าค่าที่ได้สามารถใช้ในการระบุสถานะความผิดพลาดที่ S_3 ได้ โดยหากค่า ΔFD_3 มีค่าเป็นลบ จะแสดงว่าระบบอยู่ในสภาวะปกติ แต่หากค่า ΔFD_3 มีค่าเป็นบวก จะบ่งชี้ถึงการเกิดความผิดพลาด การวิเคราะห์พฤติกรรมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้น ทำให้สามารถออกแบบกระบวนการทางฟัซซีเพื่อตรวจจับความผิดพลาดที่ S_3 ได้ โดยกำหนดความสัมพันธ์ของอินพุตที่ใช้ในการตรวจจับความผิดพลาดในรูปของกฎฟัซซี ซึ่งสามารถแสดงในรูปแบบของหน่วยความจำฟัซซีสัมพันธ์ตามที่ปรากฏในตารางที่ 5.4 ตัวอย่างการตรวจจับความผิดพลาดที่ S_3 สามารถอธิบายได้ดังนี้

กรณีที่ 1 $v'_{C3}/V'_{C3,ref}$ เป็นสมาชิกของเซตบวกค่าน้อย ($v'_{C3}/V'_{C3,ref} \in PS$) ก็ต่อเมื่อ v'_{C3} มีค่าน้อยกว่า 0.2 เท่าของ $V'_{C3,ref}$ กระบวนการฟิชซีของ v''_{C3} ณ เวลาใด ๆ พบว่ามีความเป็นไปได้ที่จะเข้าเงื่อนไขกฎฟิชซีข้อที่ 1 ถึงกฎที่ 3 กระบวนการดังกล่าวสามารถอธิบายได้ดังนี้

- 1) กฎฟิชซีข้อที่ 1 เมื่อ $v''_{C3}/V''_{C3,ref}$ เป็นบวกอยู่ในเซต PS หมายถึง v''_{C3} ณ เวลาที่พิจารณามีค่าต่ำกว่า 0.4 เท่าของ $V''_{C3,ref}$ ดังนั้นตัวตรวจจับความผิดพลาดต้องสร้าง ΔFD_3 ที่เป็นลบน้อย (NS) จะแสดงถึงการทำงานของวงจรในสภาวะนี้เป็นการทำงานปกติ
- 2) กฎฟิชซีข้อที่ 2 เมื่อ $v''_{C3}/V''_{C3,ref}$ มีค่าเป็นศูนย์อยู่ในเซต PM หมายถึง v''_{C3} ณ เวลาที่พิจารณามีค่าอยู่ในช่วง 0.3 ถึง 2.5 เท่าของ m_{FS2} ดังนั้นตัวตรวจจับความผิดพลาดต้องสร้าง ΔFD_3 ที่เป็นลบน้อย (NS) จะแสดงถึงการทำงานของวงจรในสภาวะนี้เป็นการทำงานปกติ
- 3) กฎฟิชซีข้อที่ 3 เมื่อ $v''_{C3}/V''_{C3,ref}$ เป็นบวกอยู่ในเซต PL หมายถึง v''_{C3} ณ เวลาที่พิจารณามีค่ามากกว่า 1.8 เท่าของ $V''_{C3,ref}$ ดังนั้นตัวตรวจจับความผิดพลาดต้องสร้าง ΔFD_3 ที่เป็นลบน้อย (NS) จะแสดงถึงการทำงานของวงจรในสภาวะนี้เป็นการทำงานปกติ

กรณีที่ 2 $v'_{C3}/V'_{C3,ref}$ เป็นสมาชิกของเซตค่าบวกปานกลาง ($v'_{C3}/V'_{C3,ref} \in PM$) ก็ต่อเมื่อ v'_{C3} ณ เวลาที่พิจารณามีค่าอยู่ในช่วง 0.1 ถึง 1.9 เท่าของ $V'_{C3,ref}$ กระบวนการฟิชซีของ v''_{C3} ณ เวลาใด ๆ พบว่ามีความเป็นไปได้ที่จะเข้าเงื่อนไขกฎฟิชซีข้อที่ 4 ถึงกฎที่ 6 กระบวนการดังกล่าวสามารถอธิบายได้ดังนี้

- 4) กฎฟิชซีข้อที่ 4 เมื่อ $v''_{C3}/V''_{C3,ref}$ เป็นบวกอยู่ในเซต PS หมายถึง v''_{C3} ณ เวลาที่พิจารณามีค่าต่ำกว่า 0.4 เท่าของ $V''_{C3,ref}$ ดังนั้นตัวตรวจจับความผิดพลาดต้องสร้าง ΔFD_3 ที่เป็นศูนย์ (Z) จะแสดงถึงการทำงานของวงจรในสภาวะนี้เป็นการทำงานปกติ
- 5) กฎฟิชซีข้อที่ 5 เมื่อ $v''_{C3}/V''_{C3,ref}$ มีค่าเป็นศูนย์อยู่ในเซต PM หมายถึง v''_{C3} ณ เวลาที่พิจารณามีค่าอยู่ในช่วง 0.3 ถึง 2.5 เท่าของ m_{FS2} ดังนั้นตัวตรวจจับความผิดพลาดต้องสร้าง ΔFD_3 ที่เป็นบวก (P) จะแสดงถึงการทำงานของวงจรในสภาวะนี้เกิดความผิดพลาดที่ S_3
- 6) กฎฟิชซีข้อที่ 6 เมื่อ $v''_{C3}/V''_{C3,ref}$ เป็นบวกอยู่ในเซต PL หมายถึง v''_{C3} ณ เวลาที่พิจารณามีค่ามากกว่า 1.8 เท่าของ $V''_{C3,ref}$ ดังนั้นตัวตรวจจับความผิดพลาด

ต้องสร้าง ΔFD_3 ที่เป็นศูนย์ (Z) จะแสดงถึงการทำงานของวงจรในสภาวะนี้เป็นการทำงานปกติ

กรณีที่ 2 $v'_{C3}/V'_{C3,ref}$ เป็นสมาชิกของเซตค่าบวกปานกลาง ($v'_{C3}/V'_{C3,ref} \in PM$) ก็ต่อเมื่อ v'_{C3} ณ เวลาที่พิจารณามีค่ามากกว่า 1.8 เท่าของ $V'_{C3,ref}$ กระบวนการฟิชซีของ v''_{C3} ณ เวลาใด ๆ พบว่ามีความเป็นไปได้ที่จะเข้าเงื่อนไขกฎฟิชซีข้อที่ 7 ถึงกฎที่ 9 กระบวนการดังกล่าวสามารถอธิบายได้ดังนี้

- 7) กฎฟิชซีข้อที่ 7 เมื่อ $v''_{C3}/V''_{C3,ref}$ เป็นบวกอยู่ในเซต PS หมายถึง v''_{C3} ณ เวลาที่พิจารณามีค่าต่ำกว่า 0.4 เท่าของ $V''_{C3,ref}$ ดังนั้นตัวตรวจจับความผิดพลาดต้องสร้าง ΔFD_3 ที่เป็นลบน้อย (NS) จะแสดงถึงการทำงานของวงจรในสภาวะนี้เป็นการทำงานปกติ
- 8) กฎฟิชซีข้อที่ 8 เมื่อ $v''_{C3}/V''_{C3,ref}$ มีค่าเป็นศูนย์อยู่ในเซต PM หมายถึง v''_{C3} ณ เวลาที่พิจารณามีค่าอยู่ในช่วง 0.3 ถึง 2.5 เท่าของ m_{FS2} ดังนั้นตัวตรวจจับความผิดพลาดต้องสร้าง ΔFD_3 ที่เป็นลบน้อย (NS) จะแสดงถึงการทำงานของวงจรในสภาวะนี้เป็นการทำงานปกติ
- 9) กฎฟิชซีข้อที่ 9 เมื่อ $v''_{C3}/V''_{C3,ref}$ เป็นบวกอยู่ในเซต PL หมายถึง v''_{C3} ณ เวลาที่พิจารณามีค่ามากกว่า 1.8 เท่าของ $V''_{C3,ref}$ ดังนั้นตัวตรวจจับความผิดพลาดต้องสร้าง ΔFD_3 ที่เป็นลบน้อย (NS) จะแสดงถึงการทำงานของวงจรในสภาวะนี้เป็นการทำงานปกติ

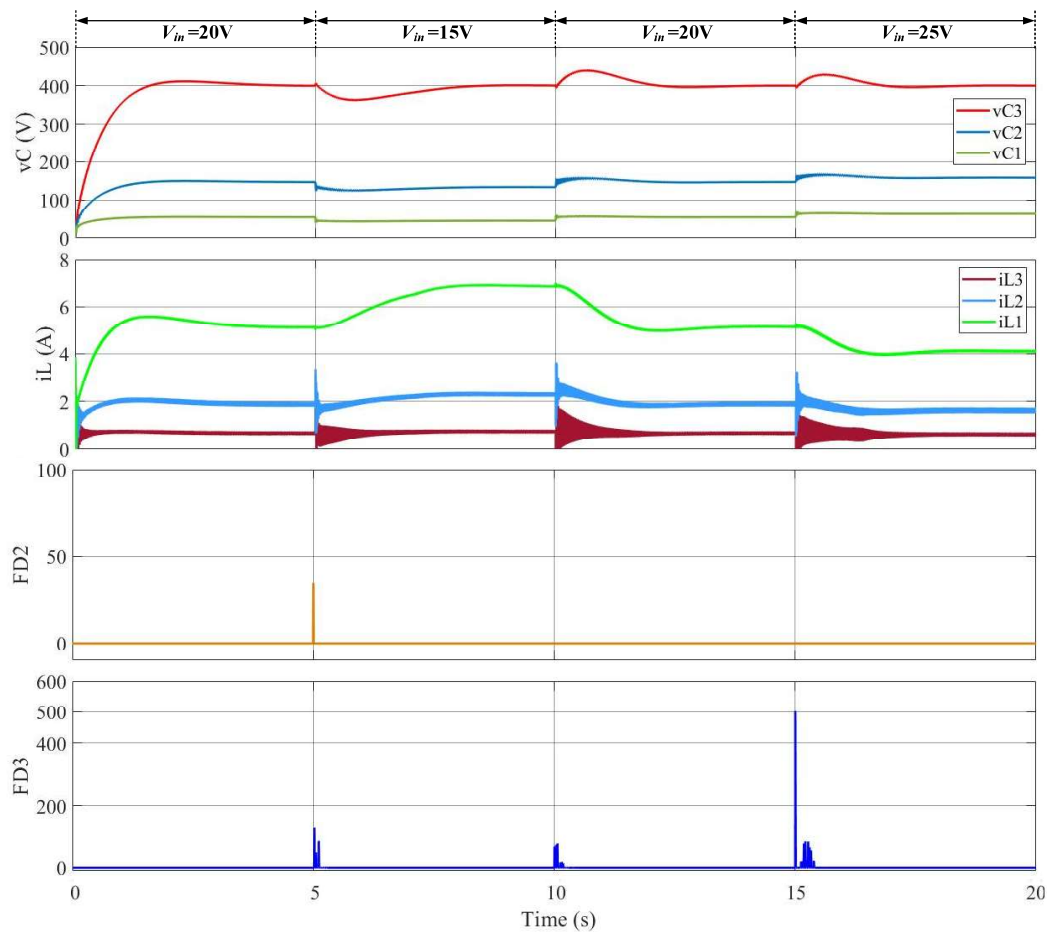
กระบวนการแสดงสถานะการผิดพลาดที่ S_3 จะมีกระบวนการคล้ายคลึงกับการแสดงสถานะการผิดพลาดที่ S_2 โดยจะแสดงสถานะการทำงานปกติ เมื่อ FWS_3 เป็น 0 โดยเมื่อเกิดความผิดพลาดที่ S_3 สถานะ FSW_3 จะเป็น 1 อย่างไรก็ตามจากการสังเกตพฤติกรรมการทำงานของวงจร พบว่าเมื่อมีการเปลี่ยนจุดการทำงานของแรงดัน V_{in} และ V_{ref} บางกรณี ที่ทำให้กระแส i_{L3} มีค่าเป็น 0A ในระยะเวลาสั้น ๆ เท่านั้น โดยในช่วงดังกล่าว C_3 จะทำหน้าที่คายประจุให้กับ R ทั้งในช่วงเวลาดังกล่าวควรเป็นช่วงการอัดประจุ ซึ่งผลตอบสนองดังกล่าวตรงกับกฎฟิชซีของการตรวจจับความผิดพลาดของสวิตช์ตัวที่ 3 ข้อที่ 5 ที่ให้ ΔFD_3 เป็นบวก (P) จึงอาศัยวิธีการบวกสะสมค่าของ ΔFD_3 เข้าช่วยเพื่อให้การตรวจจับความผิดพลาดที่ S_3 มีความถูกต้องยิ่งขึ้น ค่าสัญญาณความผิดพลาดที่ S_3 (FD_3) สามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (5.12)

$$FD_{3,n} = FD_{3,n-1} + \Delta FD_{3,n} \quad (5.12)$$

จากสมการคำนวณหาเอาต์พุต FD_2 ที่กล่าวมาเมื่อเป็นไปได้อัตโนมัติและลบ โดยที่ค่าบวกจะแสดงถึงการทำงานของวงจรในสถานะเกิดความผิดปกติ เพื่อให้ได้การตรวจจับที่ถูกต้อง จึงกำหนดขอบเขตการตรวจจับความผิดปกติของเอาต์พุต FD_3 อยู่ในช่วงศูนย์ถึงค่าจำกัดการตรวจจับความผิดปกติที่ S_3 (FLD_3) เพื่อหลีกเลี่ยงการตรวจจับผิดพลาดเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงจุดการทำงาน จึงทำการศึกษาพฤติกรรมการทำงานของวงจรภายใต้การเปลี่ยนแปลงจุดการทำงาน เพื่อให้ได้ค่า FLD_3 ที่เหมาะสมจากการศึกษาพฤติกรรม ซึ่งจะกล่าวในเนื้อหาถัดไป ดังนั้นเพื่อให้ได้การตรวจจับที่ถูกต้อง กระบวนการแสดงสถานะการผิดปกติจะแสดงสถานะ FSW_3 เป็น 1 ก็ต่อเมื่อค่าสัญญาณ FD_3 หาดด้วย FLD_3 มีค่ามากกว่า 1

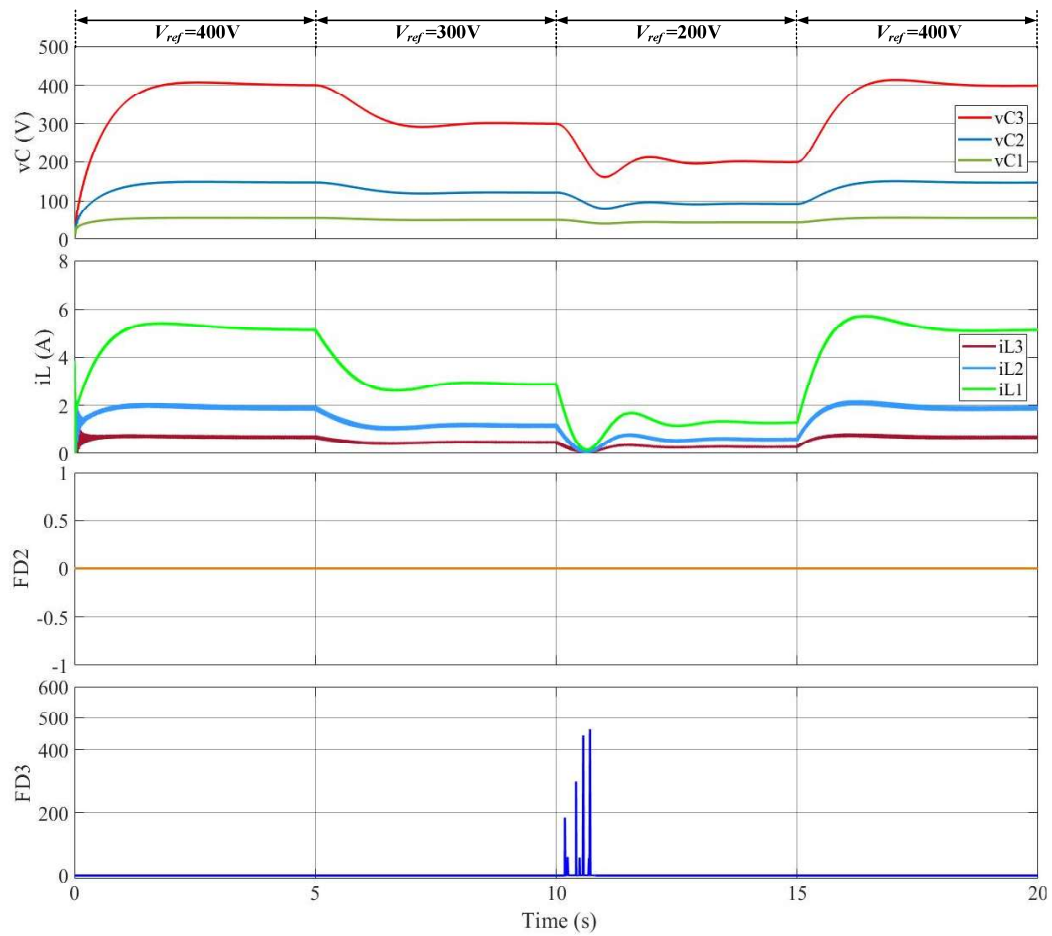
จากกระบวนการแสดงสถานะการผิดปกติ (Fault Status Operation) ของการตรวจจับความผิดปกติที่ S_2 และ S_3 มีค่าจำกัดการตรวจจับความผิดปกติสวิตช์ (FLD_2, FLD_3) ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากพฤติกรรมกรณีการเปลี่ยนแปลงจุดการทำงานโดยแบ่งออกเป็น 3 กรณี ประกอบด้วย ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต (V_{in}) ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิง (V_{ref}) และผลการจำลองสถานการณ์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทาน (R) การจำลองสถานการณ์แสดงแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ (v_{C1}, v_{C2}, v_{C3}) กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (i_{L1}, i_{L2}, i_{L3}) ค่าจำกัดการตรวจจับความผิดปกติ FLD_2 และ FLD_3 แสดงดังรูปที่ 5.37 โดยที่เอาต์พุตของการตรวจจับความผิดปกติ FD_2 และ FD_3 ได้จากสมการที่ (5.6) และ (5.12) ตามลำดับ

กรณีที่ 1 การจำลองสถานการณ์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง V_{in} เป็น 20V, 15V, 20V และ 25V ในช่วงเวลา 0s, 5s, 10s และ 15s ตามลำดับ โดยที่คงค่า V_{ref} และ R ไว้ที่ 400V และ 1600Ω ตามลำดับ ดังรูปที่ 5.37 สังเกตเห็นได้ว่า FD_2 มีขนาดเท่าประมาณ 0, 35, 0 และ 0 ตามลำดับ เนื่องจากเมื่อมีการเปลี่ยนแปลง V_{in} จาก 20V เป็น 15V จะส่งผลให้ m_{iL1} เกิดการสั้นไกว และมีค่าการเปลี่ยนแปลง เกินช่วง $-2m_{ref}$ ถึง $2m_{ref}$ A/s อีกทั้ง D เกิดการสั้นไกว ในเวลาสั้น ๆ ผลตอบสนองที่เกิดขึ้นตรงกับกฎฟัซซีที่ให้เอาต์พุต ΔFD_2 เป็นค่า Positive สำหรับการตรวจจับความผิดปกติที่ S_2 ในขณะเดียวกัน FD_3 มีขนาดเท่าประมาณ 0, 125, 80 และ 500 ตามลำดับ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงจุดการทำงานในช่วงเวลาที่ 5s, 10s และ 15s ทำให้กระแส i_{L3} มีค่าเป็น 0A ในระยะเวลาสั้น ๆ เท่านั้น โดยในช่วงดังกล่าว C_3 จะทำหน้าที่คายประจุให้กับ R ทั้งในช่วงเวลาดังกล่าวควรเป็นช่วงการอัดประจุ ซึ่งผลตอบสนองที่ตรงกับกฎฟัซซีที่ให้เอาต์พุต ΔFD_3 เป็นค่า Positive ในกระบวนการฟัซซีสำหรับการตรวจจับความผิดปกติที่ S_3 ดังนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงความผิดพลาดในการตรวจจับความผิดปกติจึงกำหนดค่า FLD_2 และ FLD_3 เป็น 50 และ 600 ตามลำดับ



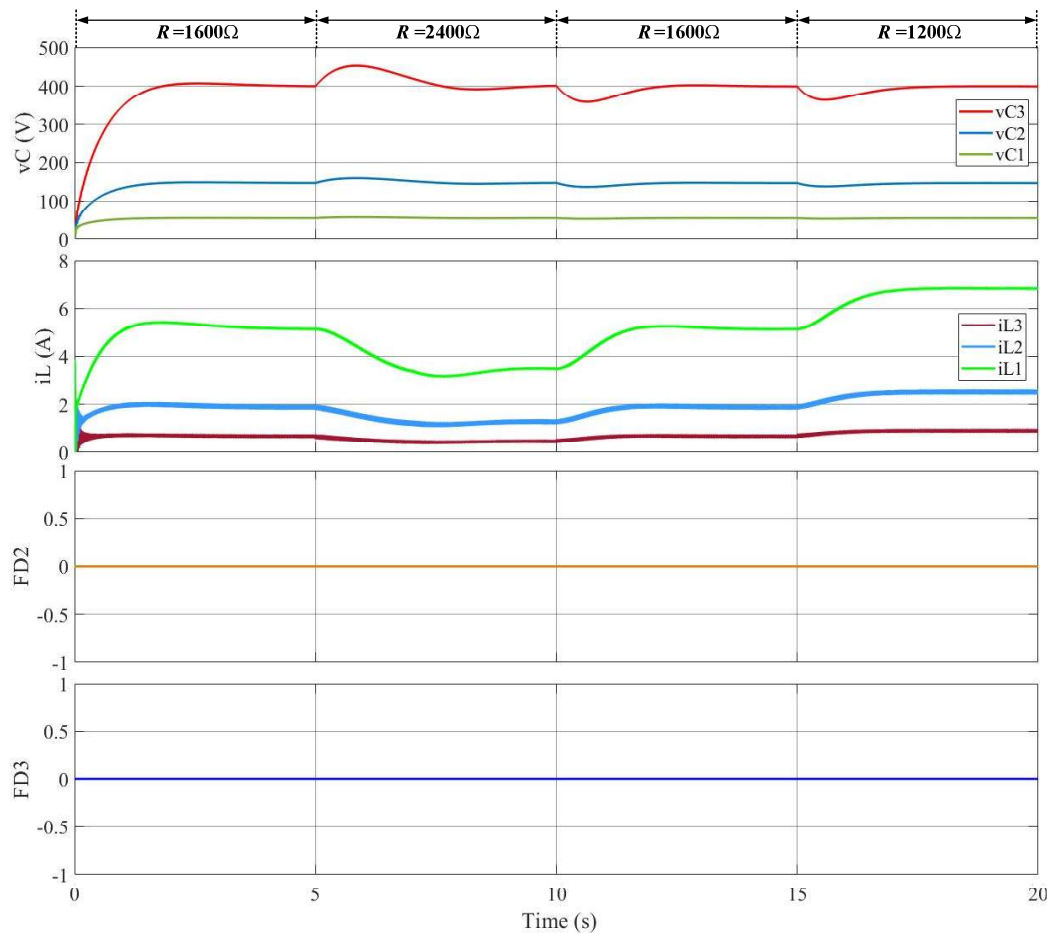
รูปที่ 5.37 การจำลองสถานการณ์หาค่า FLD_2 และ FLD_3 กรณีเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต

กรณีที่ 2 การจำลองสถานการณ์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง V_{ref} เป็น 400V, 300V, 200V และ 400V ในช่วงเวลา 0s, 5s, 10s และ 15s ดังรูปที่ 5.38 พบว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดัน V_{ref} ลดลงจาก 300V เป็น 200V ส่งผลให้ FD_3 มีขนาดสูงสุดประมาณ 460 เนื่องจากขณะที่การเปลี่ยนแปลง V_{ref} จาก 300V เป็น 200V เท่านั้นที่ส่งผลให้ i_{L3} มีค่าเป็น 0A ในช่วงระยะเวลาสั้น ๆ ซึ่งผลตอบสนองที่เกิดขึ้นตรงกับกฎฟัซซีที่ให้เอาต์พุต ΔFD_3 เป็นค่า Positive ของการตรวจจับความผิดปกติที่ S_3 ในขณะเดียวกันเมื่อพิจารณา FD_2 จะเห็นได้ว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลง V_{ref} แต่ละค่า จะได้ค่า FD_2 มีขนาดเท่ากับศูนย์ เนื่องจากผลตอบสนองที่เกิดขึ้น ไม่ตรงกับกฎฟัซซีที่ให้เอาต์พุต ΔFD_2 เป็นค่า Positive ในกระบวนการฟัซซีของการตรวจจับความผิดปกติที่ S_2 อย่างไรก็ตามการกำหนดค่า FLD_3 ที่ 600 ก่อนหน้านี้ ยังมีความครอบคลุมและสามารถหลีกเลี่ยงความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นในการตรวจจับความผิดปกติที่ S_3 ได้



รูปที่ 5.38 การจำลองสถานการณ์หาค่า FLD_2 และ FLD_3 กรณีเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิง

กรณีที่ 3 การจำลองสถานการณ์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง R เป็น 1600Ω , 2400Ω , 1600Ω และ 1200Ω ในช่วงเวลา $0s$, $5s$, $10s$ และ $15s$ ตามลำดับ โดยที่คงค่า V_{in} และ V_{ref} ไว้ที่ $20V$ และ $400V$ ตามลำดับ ผลการจำลองสถานการณ์กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ และเอาต์พุตของการตรวจจับความผิดพร่องทั้งสองแสดงดังรูปที่ 5.39 สังเกตเห็นได้ว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลง R แต่ละค่า ส่งผลให้ค่าเอาต์พุต ΔFD_2 และ ΔFD_3 มีค่าเป็นศูนย์ เนื่องจากผลตอบสนองจากการเปลี่ยนแปลงจุดการทำงานที่เกิดขึ้น ไม่ตรงกับกฎฟิซซีที่ให้เอาต์พุต ΔFD_2 และ ΔFD_3 เป็นค่า Positive ในกระบวนการฟิซซีของการตรวจจับความผิดพร่องที่ S_2 และ S_3 ตามลำดับ



รูปที่ 5.39 การจำลองสถานการณ์หาค่า FLD_2 และ FLD_3 กรณีเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทาน

เพื่อหลีกเลี่ยงความผิดพลาดที่เกิดจากการตรวจจับความผิดพลาด จำเป็นต้องมีการพิจารณาค่าจำกัดการตรวจจับความผิดพลาดสวิตช์ทั้งสอง (FLD_2 , FLD_3) โดยอาศัยผลจำลองสถานการณ์การทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นภายใต้การควบคุมพีชชีที่พัฒนาขึ้น เมื่อการทำงานการเปลี่ยนแปลงจุดการทำงาน ซึ่งพบว่ากรณีเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตให้ผลตอบสนองสั้น ๆ ที่คล้ายกับการเกิดความผิดพลาดที่ S_2 และ S_3 ซึ่งผลตอบสนองที่เกิดขึ้นตรงกับกฎพีชชีที่ให้เอาต์พุต ΔFD_2 และ ΔFD_3 เป็นค่า Positive เมื่อพิจารณาเอาต์พุตของการตรวจจับความผิดพลาด FD_2 และ FD_3 ได้จากสมการที่ (5.6) และ (5.12) ตามลำดับ ภายใต้การเปลี่ยนแปลงจุดการทำงานได้ศึกษา ซึ่งจะสามารถกำหนดค่า FLD_2 และ FLD_3 ที่สามารถหลีกเลี่ยงความผิดพลาดที่เกิดจากการตรวจจับความผิดพลาดได้ดังตารางที่ 5.5

จากการศึกษาพฤติกรรมการทำงานของวงจรในสภาวะปกติในสภาวะการเปลี่ยนแปลงจุดการทำงานต่าง ๆ และเมื่อเกิดความผิดปกติ ภายใต้การทำงานการควบคุมฟuzzyที่พัฒนาขึ้น โดยพิจารณาผลตอบแทนของกระแส i_{L1} แรงดัน v_{C3} และ สัญญาณ D ภายใต้การควบคุมฟuzzyที่พัฒนาขึ้น สามารถนำมาพัฒนาวิธีการตรวจจับความผิดปกติ (Fault detection strategy) เพื่อที่จะสามารถระบุตำแหน่งสวิตช์ที่เกิดความผิดปกติภายในวงจร โดยใช้กระบวนการฟuzzyในการตรวจจับความผิดปกติแสดงดังรูปที่ 5.17 การตรวจจับความผิดปกติของแต่ละสวิตช์มีพารามิเตอร์ต้องพิจารณาในการดำเนินการปรับค่าสเกล หรือเรียกว่าการนอร์มัลไลซ์ (Normalization) เพื่อปรับขนาดค่าให้อยู่ภายในขอบเขตการทำงานที่การควบคุมฟuzzyที่พัฒนาขึ้นสามารถทำงานได้อย่างครอบคลุม ดังตารางที่ 5.5 โดยพิจารณาจากค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ประกอบด้วยค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุภายในวงจร และค่าพารามิเตอร์ของการควบคุมฟuzzyที่พัฒนาขึ้น ดังตารางที่ 3.3, 3.4 และ 4.2 ตามลำดับ อีกทั้งยังมีค่าจำกัดการตรวจจับความผิดปกติทั้งสอง (FLD_2, FLD_3)

ตารางที่ 5.5 ค่าพารามิเตอร์ของการตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรที่พัฒนาขึ้น

การตรวจจับความผิดปกติ	พารามิเตอร์	สัญลักษณ์	ขนาด	หน่วย
S_1	ค่าความชันของกระแสขณะเกิดความผิดปกติที่ S_1	m_{FS1}	2,319	A/s
	ค่ากระแสที่ไหลผ่าน L_1 ในสภาวะปกติ	i_{FS1}	5	A
S_2	ค่าวัฏจักรหน้าที่อ้างอิงของสวิตช์	D_{ref}	0.635	–
	ค่าความชันของกระแสขณะเกิดความผิดปกติที่ S_2	m_{FS2}	200	A/s
	ค่าจำกัดการตรวจจับความผิดปกติที่ S_2	FLD_2	50	–
S_3	ค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งอ้างอิงของ v_{C3}	$V'_{C3,ref}$	–500	V/s
	ค่าอนุพันธ์อันดับสองอ้างอิงของ v_{C3}	$V''_{C3,ref}$	625	V/s ²
	ค่าจำกัดการตรวจจับความผิดปกติที่ S_3	FLD_3	600	–

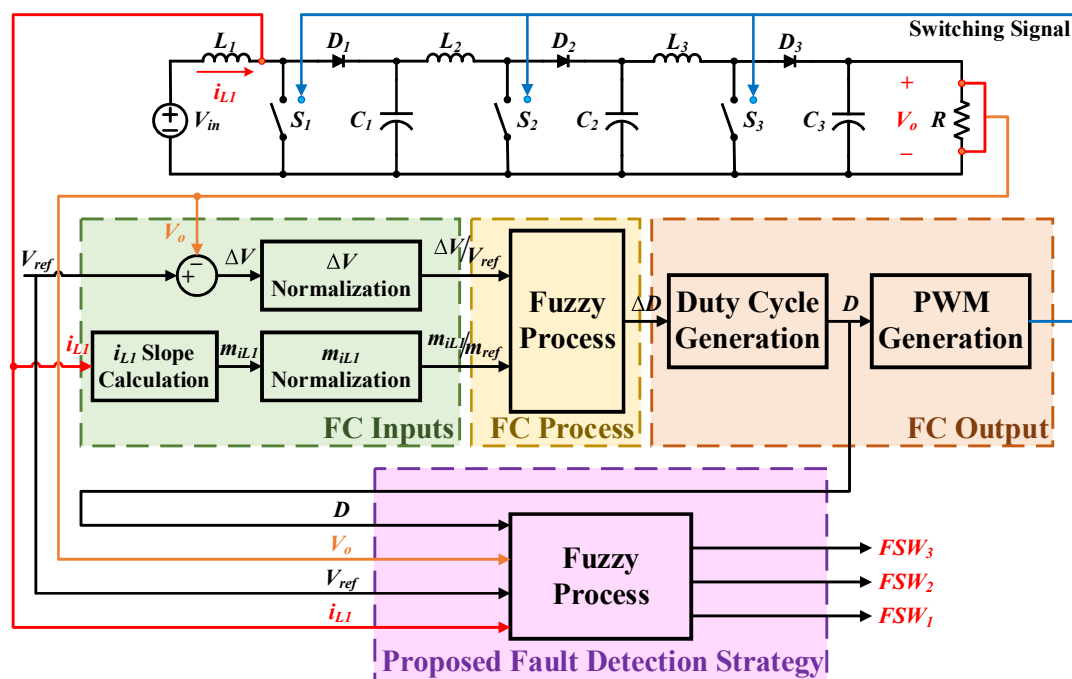
5.4 การจำลองสถานการณ์

เพื่อแสดงประสิทธิภาพของตัวตรวจจับความผิดปกติที่พัฒนาขึ้นที่สามารถตรวจจับได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว จะอาศัยโปรแกรม MATLAB SIMULINK เข้าช่วยในการจำลองสถานการณ์การตรวจจับ

ความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นภายใต้การควบคุมฟัซซีที่พัฒนาขึ้น โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ของวงจร และค่าพารามิเตอร์การควบคุมฟัซซีที่พัฒนาขึ้น ที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 และ 4 ตามลำดับ การจำลองสถานการณ์การแบ่งออกเป็น 3 กรณี ได้แก่ การตรวจจับความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรในสภาวะการทำงานปกติ การตรวจจับความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรภายใต้การเปลี่ยนแปลงจุดการทำงานของวงจร รวมถึงการสร้างสมมติฐานต่อความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรให้กับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้น โดยสามารถระบุตำแหน่งความผิดปกติที่เกิดขึ้นในแต่ละสวิตช์ได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว เพื่อให้การกู้คืนการทำงานของวงจรจากความผิดปกติ โดยจะพิจารณากรณีที่สวิตช์ตัวใดตัวหนึ่งเกิดความผิดปกติขึ้นเท่านั้น

5.4.1 การตรวจจับความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรในสภาวะการทำงานปกติ

การจำลองสถานการณ์การตรวจจับความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรในสภาวะการทำงานปกติ เพื่อยืนยันว่าวิธีการตรวจจับความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรที่พัฒนาขึ้นนั้นมีความสามารถในการตรวจจับความผิดปกติ และระบุตำแหน่งของสวิตช์ได้อย่างถูกต้อง การจำลองสถานการณ์การตรวจจับความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_1 , S_2 และ S_3 โดยผลการจำลองสถานการณ์จะแสดงค่าแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ และสัญญาณการตรวจจับความผิดปกติ ตั้งแต่เริ่มต้นการทำงานของวงจรในสภาวะปกติ และเกิดความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรที่วินาทีที่ 5 ทั้งนี้โครงสร้างที่ใช้แสดงดังรูปที่ 5.40



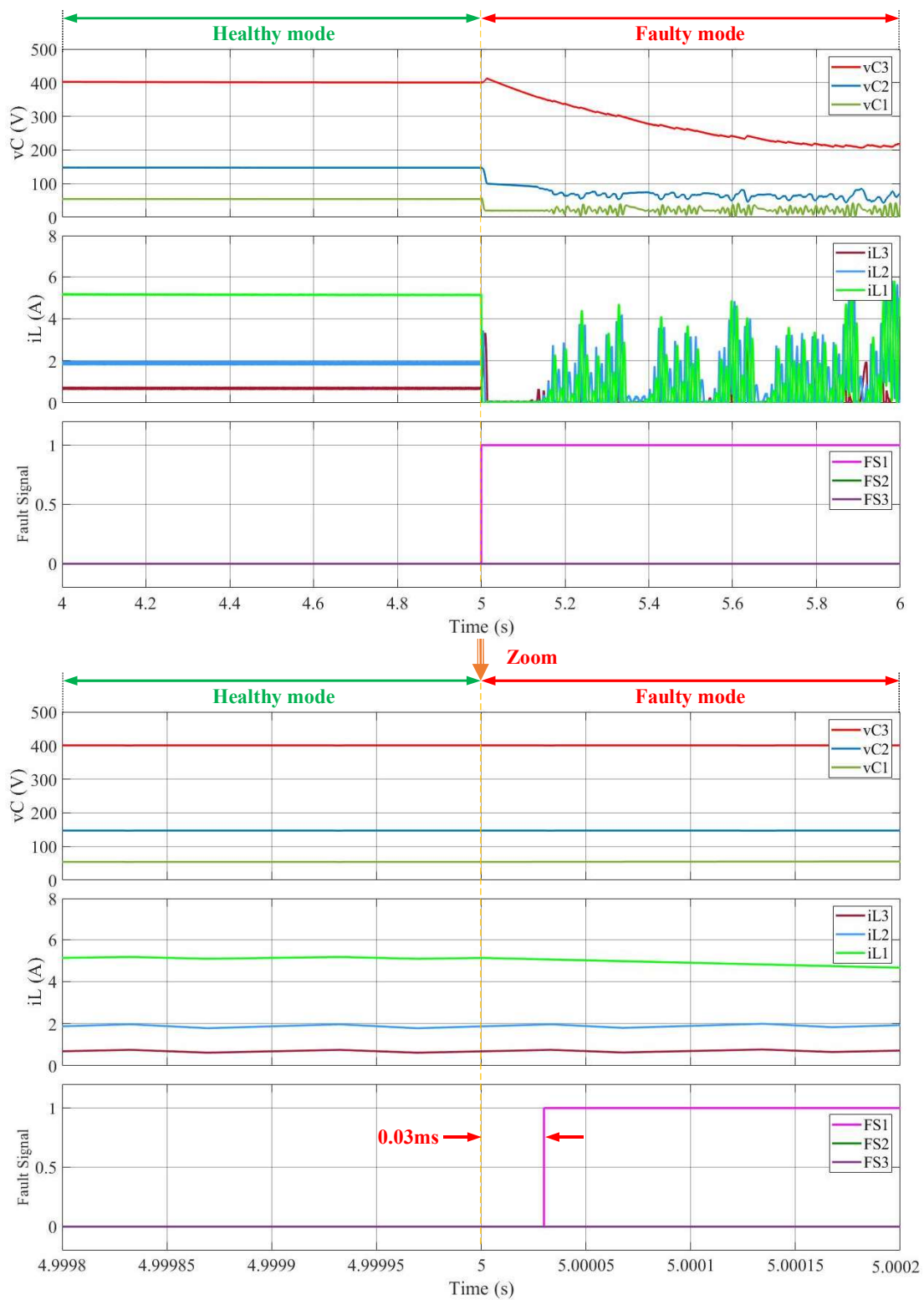
รูปที่ 5.40 โครงสร้างการควบคุมฟัซซีและการตรวจจับความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรที่พัฒนาขึ้น

ผลการจำลองสถานการณ์การตรวจจับความผิดพร่องแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_1 , S_2 และ S_3 แสดงดังรูปที่ 5.41, 5.42 และ 5.43 ตามลำดับ พบพฤติกรรมการทำงานของวงจร และการตรวจจับความผิดพร่องที่พัฒนาขึ้นดังนี้

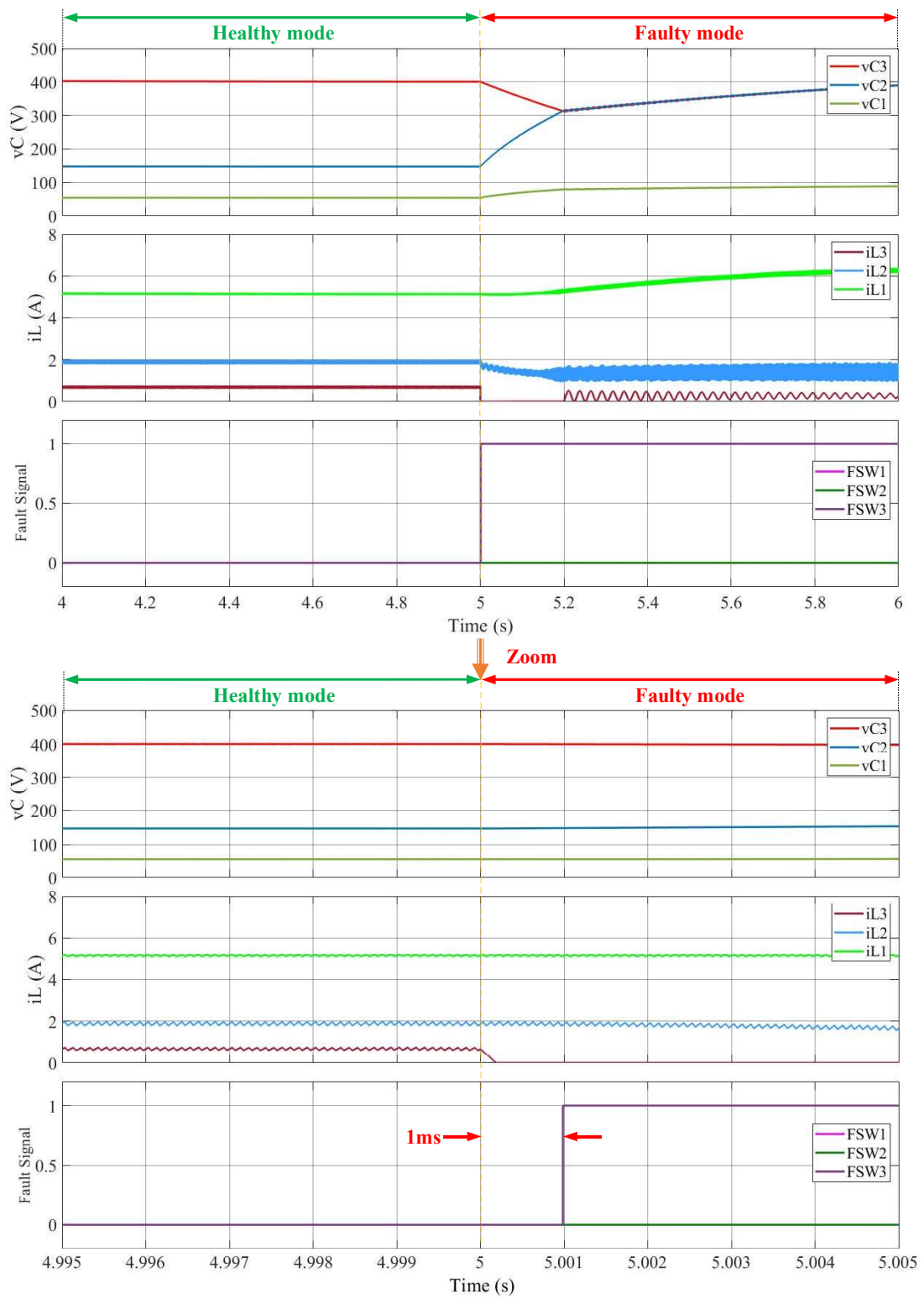
การตรวจจับความผิดพร่องแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_1 : พิจารณารูปที่ 5.41 พบว่าแรงดัน V_{C1} , V_{C2} และ V_{C3} ลดลงอย่างเห็นได้ชัด ส่วนกระแส i_{L1} , i_{L2} และ i_{L3} ลดลงอย่างรวดเร็วจนถึง 0A ในการตรวจจับความผิดพร่องแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_1 ได้อาศัย i_{L1} และ m_{iL1} เมื่อพิจารณาภาพขยายจะเห็นว่า i_{L1} มีขนาดลดลงจากสภาวะอยู่ตัวที่ค่าประมาณ 5A ลดลงจนถึง 0A และ m_{iL1} มีค่าติดลบจากการที่กระแสลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งมีค่าประมาณ $-2300A/s$ ซึ่งผลตอบสนองดังกล่าวตกอยู่ในกฎฟิซซีที่ 1 และ 4 ดังที่กล่าวไว้ดังตารางที่ 5.2 ทำให้สามารถตรวจจับความผิดพร่องที่เกิดขึ้นโดยใช้เวลา 0.03ms

การตรวจจับความผิดพร่องแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_2 : จากรูปที่ 5.47 พบว่าแรงดัน V_O ยังคงค่าตาม V_{ref} ที่ 400V โดยตัวควบคุมฟิซซี เมื่อพิจารณา m_{iL1} พบว่าเกิดการสั่นไกวที่มีค่าการเปลี่ยนแปลงมากกว่าในสภาวะปกติอย่างเห็นได้ชัด และ D เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นเกิดการสั่นไกวมากกว่าในสภาวะปกติอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งผลตอบสนองดังกล่าวตกอยู่ในกฎฟิซซีที่ 7 และ 9 ให้ค่าเอาต์พุตเป็น Positive ของการตรวจจับความผิดพร่องที่ S_2 ดังที่กล่าวไว้ดังตารางที่ 5.3 ทำให้สามารถตรวจจับความผิดพร่องที่เกิดขึ้นโดยใช้เวลา 0.0054s หรือ 5.4ms

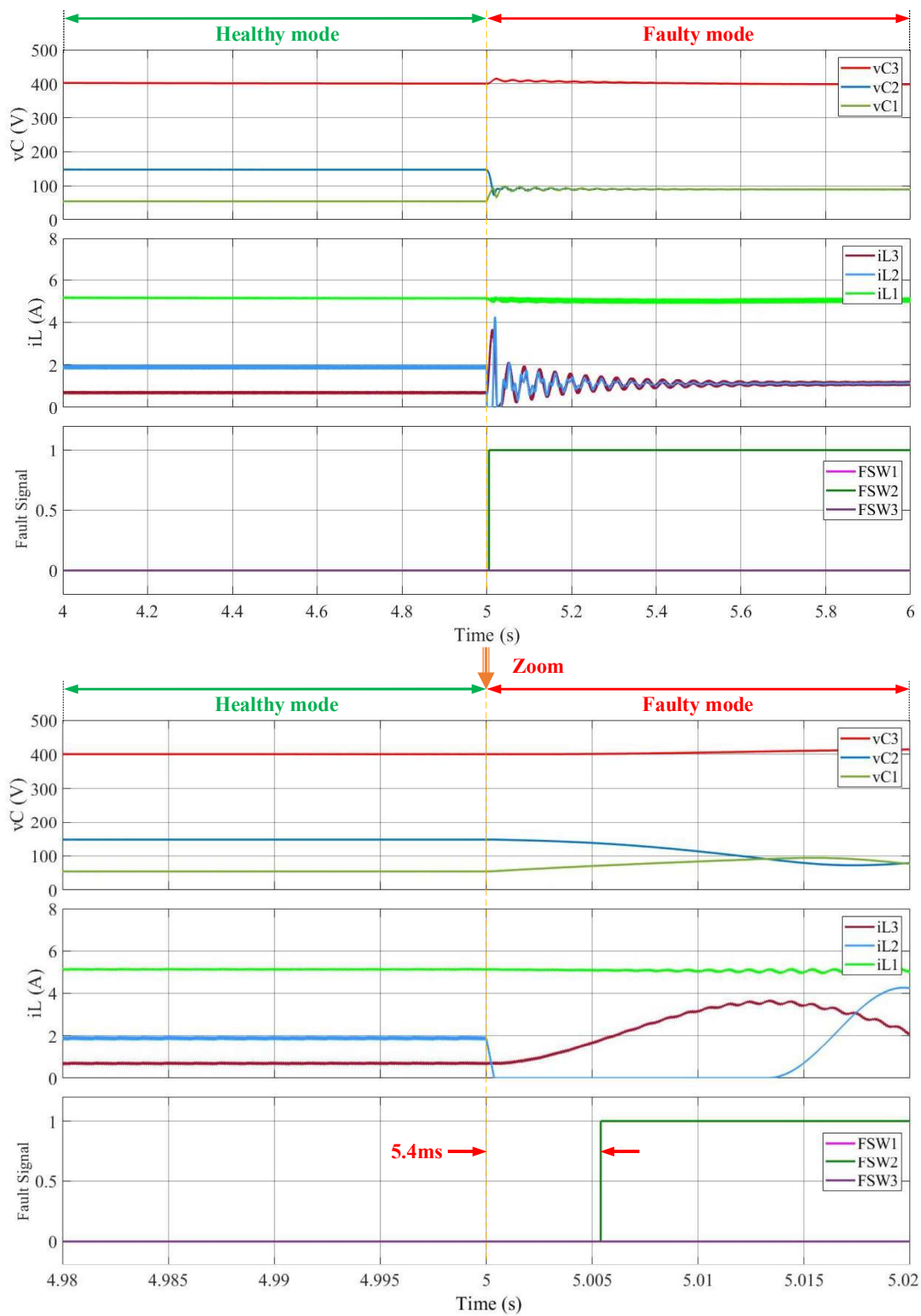
การตรวจจับความผิดพร่องแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_3 : พิจารณารูปที่ 5.41 จะเห็นว่าแรงดัน V_{C3} มีค่าลดลงจากการคายประจุให้กับ R ส่งผลให้ค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งของ V_{C3} และค่าอนุพันธ์อันดับสองของ V_{C3} มีผลตอบสนองสอดคล้องกับกฎฟิซซีที่ 5 ให้ค่าเอาต์พุตเป็นบวก ดังที่แสดงไว้ดังตารางที่ 5.4 ทำให้สามารถตรวจจับความผิดพร่องที่เกิดขึ้นโดยใช้เวลา 1ms



รูปที่ 5.41 การจำลองสถานการณ์การตรวจจับความผิดปกติแบบเปิดที่ S_1



รูปที่ 5.42 การจำลองสถานการณ์การตรวจจับความผิดปกติแบบเปิดที่ S_2



รูปที่ 5.43 การจำลองสถานการณ์การตรวจจับความผิดปกติแบบเปิดที่ S_3

5.4.2 การจำลองสถานการณ์การตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรภายใต้การเปลี่ยนแปลงจุดการทำงานของวงจร

เพื่อยืนยันประสิทธิภาพของวิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรที่พัฒนาขึ้นว่าสามารถตรวจจับความผิดปกติได้อย่างถูกต้องภายใต้สภาวะการทำงานของวงจรที่เปลี่ยนแปลง จะแบ่งออกเป็น 5 กรณี การเพิ่มขึ้นของแรงดันอินพุต การลดลงของแรงดันอินพุต การลดลงของแรงดันอ้างอิง การเพิ่มขึ้นของโหลดตัวต้านทาน และการลดลงของโหลดตัวต้านทาน

กรณีที่ 1 การจำลองสถานการณ์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง V_{in} เพิ่มขึ้นจาก 20V เป็น 25V ณ วินาทีที่ 5 โดยที่คงค่า V_{ref} และ R ไว้ที่ 400V และ 1600Ω ตามลำดับ จากรูปที่ 5.44 พบว่าในสภาวะการทำงานปกติขณะที่มีการเพิ่มขึ้นของ V_{in} ส่งผลให้แรงดัน v_{C1} , v_{C2} และ v_{C3} การพุ่งเกิน อย่างไรก็ตาม ตัวควบคุมฟัซซี่ที่พัฒนาขึ้นสามารถรักษาระดับ V_O ให้มีค่าลดลงเข้าหา V_{ref} ที่ 400V ส่วน i_{L1} และ i_{L2} มีค่าลดลง เพื่อรักษากำลังไฟฟ้าอินพุตเท่ากับกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตไว้ที่ 100W โดยใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวประมาณ 2.3s หลังจากนั้นที่วินาทีที่ 10 ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 สถานการณ์ของการเกิดความผิดปกติที่ S_1 , S_2 และ S_3 ดังที่แสดงดังรูปที่ 5.44 (ก), (ข) และ (ค) เมื่อพิจารณาภาพขยายจะเห็นได้ว่าผลตอบสนองความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรที่เกิดขึ้น ส่งผลให้ตัวตรวจจับความผิดปกติสามารถตรวจจับความผิดปกติที่ S_1 , S_2 และ S_3 โดยใช้เวลา 0.024ms, 9.239ms และ 0.978ms ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าวิธีการตรวจจับความผิดปกติที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจจับได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว อีกทั้งยังไม่มีตรวจจับความผิดปกติที่ผิดพลาดในช่วงที่การเปลี่ยนแปลงของ V_{in} ที่เพิ่มขึ้น

กรณีที่ 2 การจำลองสถานการณ์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง V_{in} ลดลงจาก 20V เป็น 15V ณ วินาทีที่ 5 โดยที่คงค่า V_{ref} และ R ไว้ที่ 400V และ 1600Ω ตามลำดับ จากรูปที่ 5.45 พบว่าในสภาวะการทำงานปกติขณะที่มีการลดลงของ V_{in} ส่งผลให้แรงดัน v_{C1} , v_{C2} และ v_{C3} เกิดการลดลง อย่างไรก็ตาม ตัวควบคุมฟัซซี่ที่พัฒนาขึ้นสามารถรักษาระดับ V_O ให้มีค่าเพิ่มขึ้นเข้าหา V_{ref} ที่ 400V ส่วน i_{L1} และ i_{L2} มีค่าเพิ่มขึ้น โดยใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวประมาณ 3s หลังจากนั้นที่วินาทีที่ 10 ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 สถานการณ์ของการเกิดความผิดปกติที่ S_1 , S_2 และ S_3 เมื่อพิจารณาภาพขยายจะเห็นได้ว่าผลตอบสนองความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรที่เกิดขึ้น ส่งผลให้ตัวตรวจจับความผิดปกติสามารถตรวจจับความผิดปกติโดยใช้เวลา 0.068ms, 7.5ms และ 2.642ms ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าวิธีการตรวจจับความผิดปกติที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจจับได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว อีกทั้งยังไม่มีตรวจจับความผิดปกติที่ผิดพลาดในช่วงที่การเปลี่ยนแปลงของ V_{in} ที่ลดลง

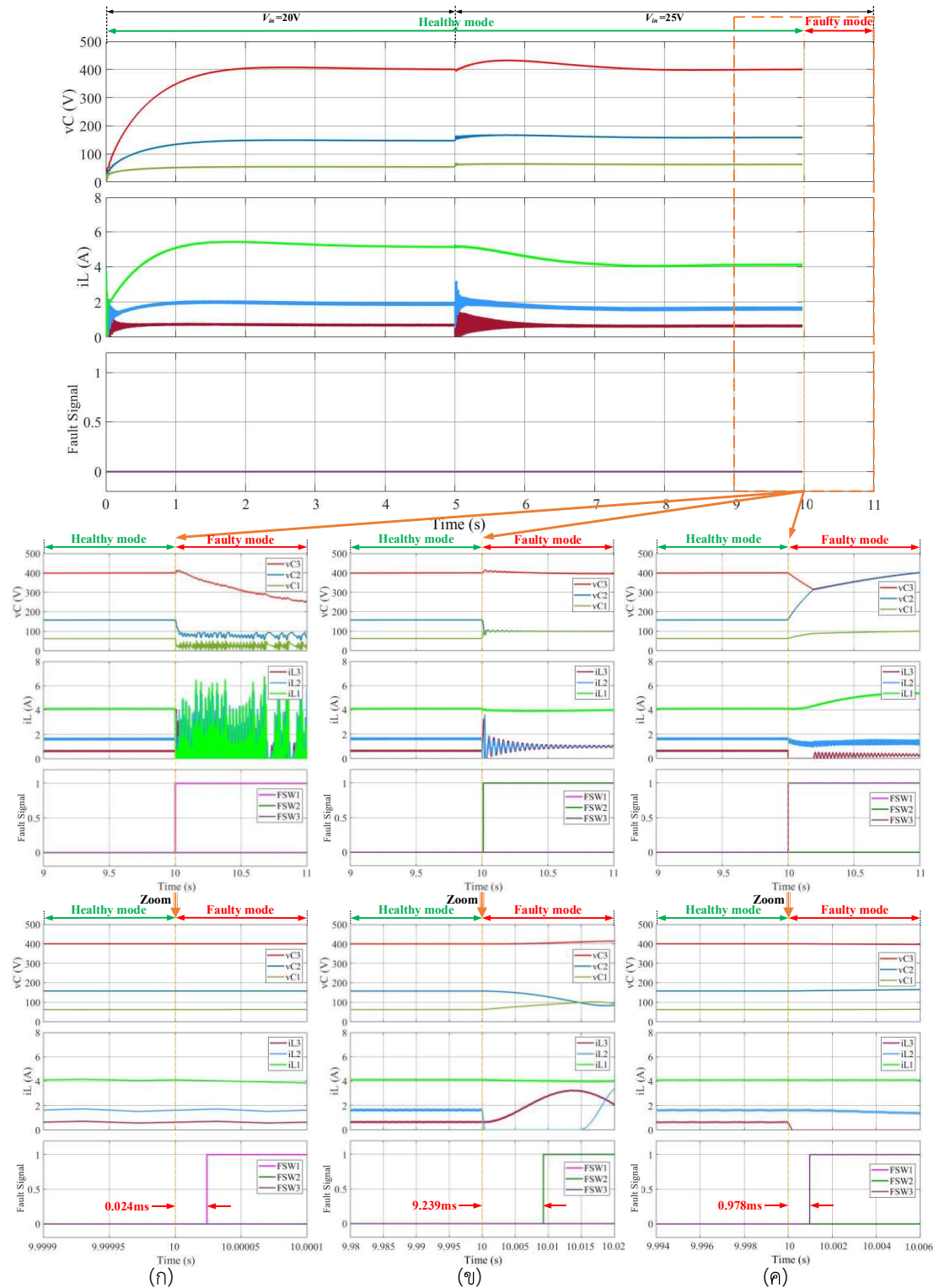
กรณีที่ 3 การจำลองสถานการณ์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง V_{ref} ลดลงจาก 400V เป็น 200V ณ วินาทีที่ 5 โดยที่คงค่า V_{in} และ R ไว้ที่ 20V และ 1600Ω ตามลำดับ หลังจากนั้นที่วินาทีที่ 10

เกิดความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_1 , S_2 และ S_3 จากรูปที่ 5.46 พบว่าในสภาวะการทำงานปกติ V_{C1} , V_{C2} และ V_{C3} ส่วน i_{L1} , i_{L2} และ i_{L3} มีผลที่ลดลง และสอดคล้องไปในทิศทางเดียวกัน ตัวควบคุมฟัซซีที่พัฒนาขึ้นสามารถรักษาระดับ V_O ให้ได้ตามต้องการที่ลดลงจาก 400V เป็น 200V โดยใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวประมาณ 3.5s หลังจากนั้นที่วินาทีที่ 10 ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 สถานการณ์ของการเกิดความผิดพลาดที่ S_1 , S_2 และ S_3 เมื่อพิจารณาภาพขยายจะเห็นได้ว่าผลตอบสนองของความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรที่เกิดขึ้น ส่งผลให้ตัวตรวจจับความผิดพลาดสามารถตรวจจับความผิดพลาดได้โดยใช้เวลา 0.083ms, 14.995ms และ 2.651ms ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าวิธีการตรวจจับความผิดพลาดที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจจับได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว อีกทั้งยังไม่มี การตรวจจับความผิดพลาดที่ผิดพลาดในช่วงที่การเปลี่ยนแปลงของ V_{ref} ที่ลดลง

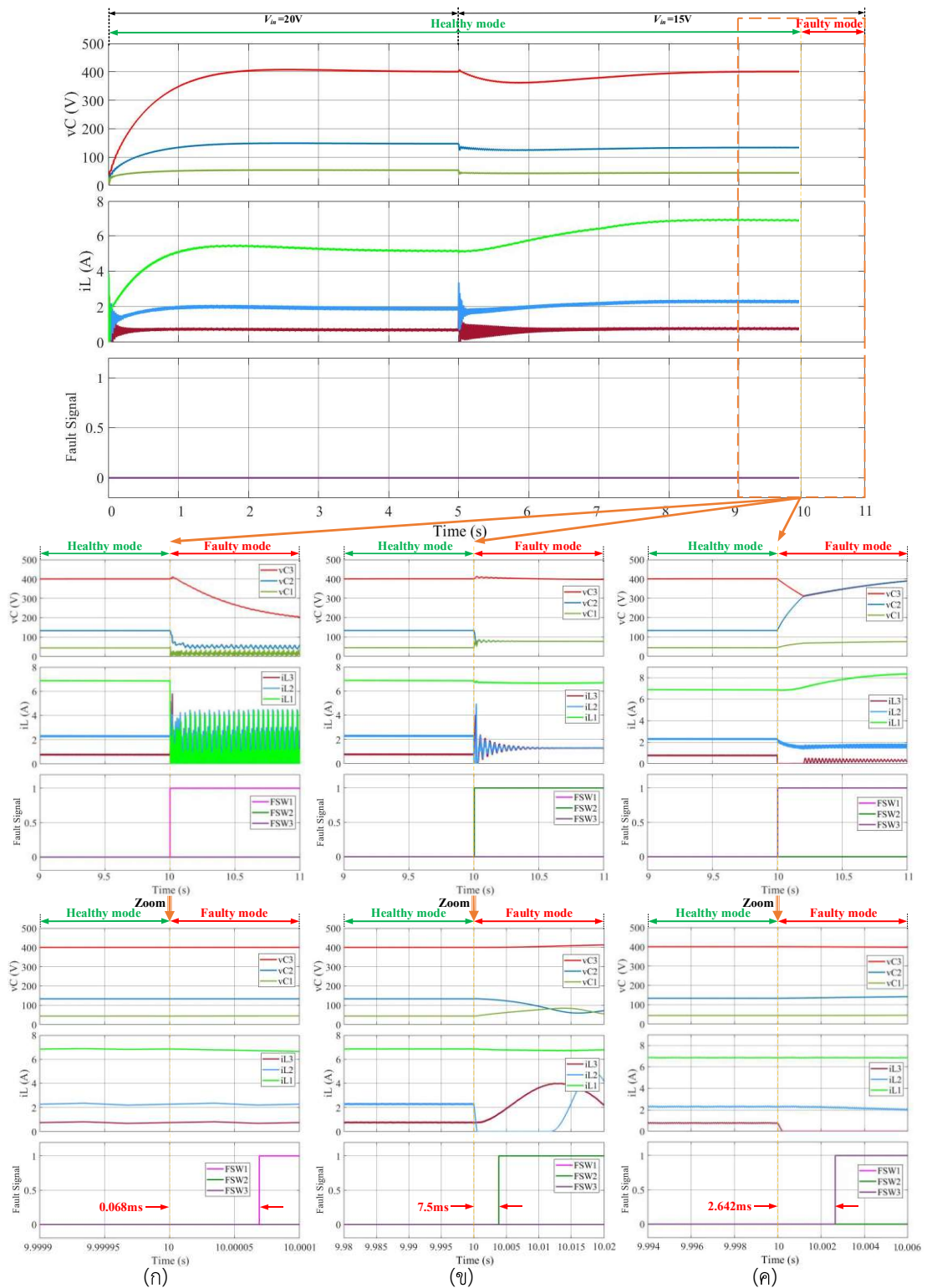
กรณีที่ 4 การจำลองสถานการณ์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง R เพิ่มขึ้นจาก 1600Ω เป็น 2400Ω ณ วินาทีที่ 5 โดยที่คงค่า V_{in} และ V_{ref} ไว้ที่ 20V และ 400V ตามลำดับ จากรูปที่ 5.47 พบว่าในสภาวะการทำงานปกติขณะที่มีการเพิ่มขึ้นของ R ส่งผลให้แรงดัน V_{C1} , V_{C2} และ V_{C3} เกิดการพุ่งเกิน จากการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าที่ลดลงจาก 100W เป็น 66.67W อย่างไรก็ตามตัวควบคุมฟัซซีที่พัฒนาขึ้นสามารถรักษาระดับ V_O ให้มีค่าตาม V_{ref} ที่ 400V โดยการปรับกระแส i_{L1} , i_{L2} และ i_{L3} ลดลง ซึ่งใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวประมาณ 3s หลังจากนั้นที่วินาทีที่ 10 ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 สถานการณ์ของการเกิดความผิดพลาดที่ S_1 , S_2 และ S_3 ดังที่แสดงดังรูปที่ 5.47 (ก), (ข) และ (ค) เมื่อพิจารณาภาพขยายจะเห็นได้ว่าผลตอบสนองของความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรที่เกิดขึ้น ส่งผลให้ตัวตรวจจับความผิดพลาดสามารถตรวจจับความผิดพลาดได้โดยใช้เวลา 0.031ms, 7.5ms และ 1.696ms ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าวิธีการตรวจจับความผิดพลาดที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจจับได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว อีกทั้งยังไม่มี การตรวจจับความผิดพลาดที่ผิดพลาดในช่วงที่การเปลี่ยนแปลงของ R ที่เพิ่มขึ้น

กรณีที่ 5 การจำลองสถานการณ์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง R ลดลงจาก 1600Ω เป็น 1200Ω ณ วินาทีที่ 5 โดยที่คงค่า V_{in} และ V_{ref} ไว้ที่ 20V และ 400V ตามลำดับจากรูปที่ 5.48 พบว่าในสภาวะการทำงานปกติขณะที่มีการลดลงของ R ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจาก 100W เป็น 133.33W ทันที ในขณะที่เดียวกันแรงดัน V_{C1} , V_{C2} และ V_{C3} เกิดการลดลง อย่างไรก็ตามตัวควบคุมฟัซซีที่พัฒนาขึ้นสามารถรักษาระดับ V_O ให้มีค่าตาม V_{ref} ที่ 400V โดยการปรับค่า i_{L1} , i_{L2} และ i_{L3} เพิ่มขึ้น ซึ่งใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวประมาณ 3s หลังจากนั้นที่วินาทีที่ 10 ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 สถานการณ์ของการเกิดความผิดพลาดที่ S_1 , S_2 และ S_3 เมื่อพิจารณาภาพขยายจะเห็นได้ว่าผลตอบสนองของความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรที่เกิดขึ้น ส่งผลให้ตัวตรวจจับความผิดพลาดสามารถตรวจจับความผิดพลาดได้โดยใช้เวลา 0.03ms, 4.559ms และ 1.043ms ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าวิธีการตรวจจับความผิดพลาดที่พัฒนาขึ้น

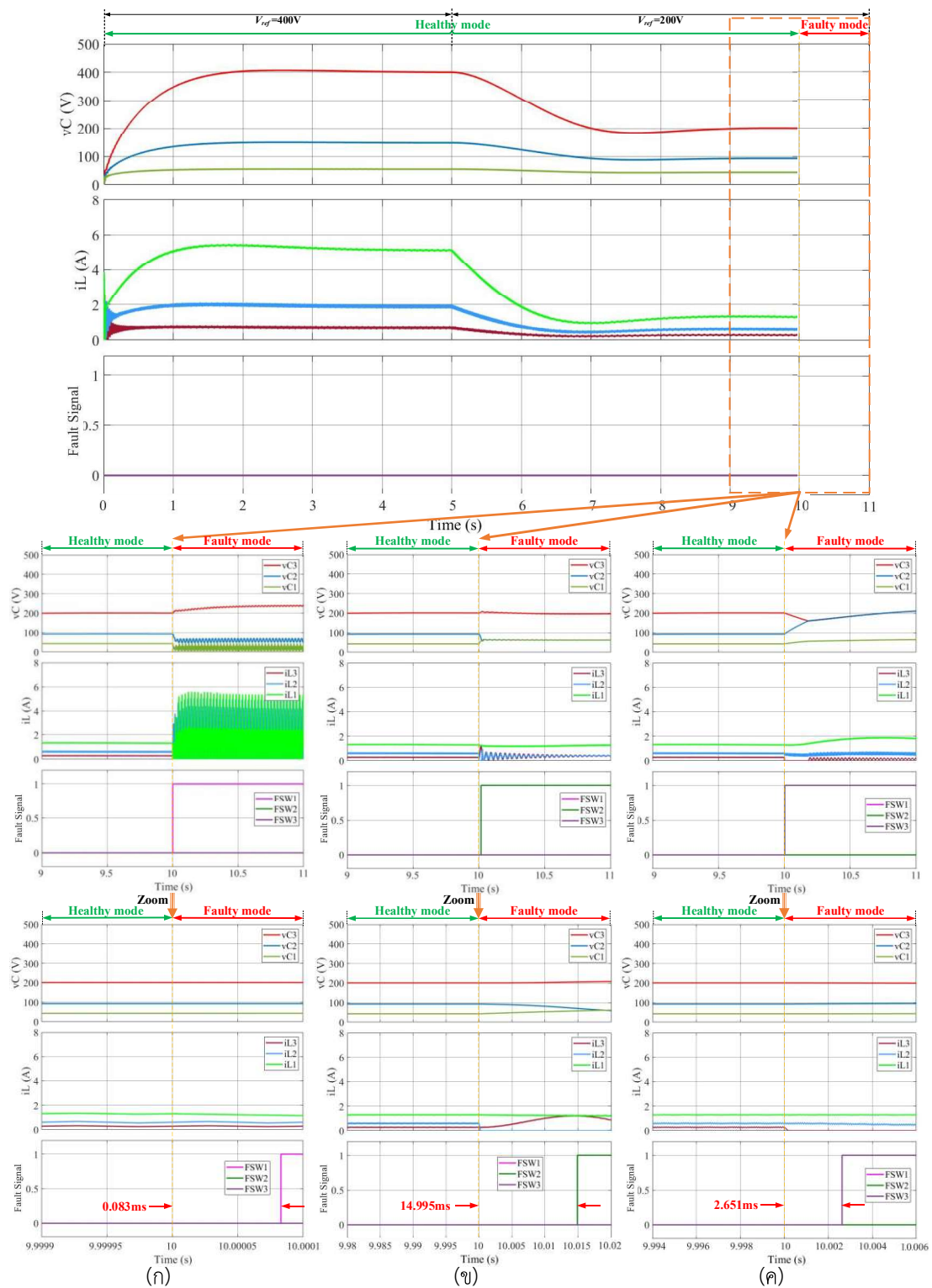
สามารถตรวจจับได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว อีกทั้งยังไม่มี การตรวจจับความผิดปกติที่ผิดพลาดในช่วงที่ การเปลี่ยนแปลงของ R ที่ลดลง



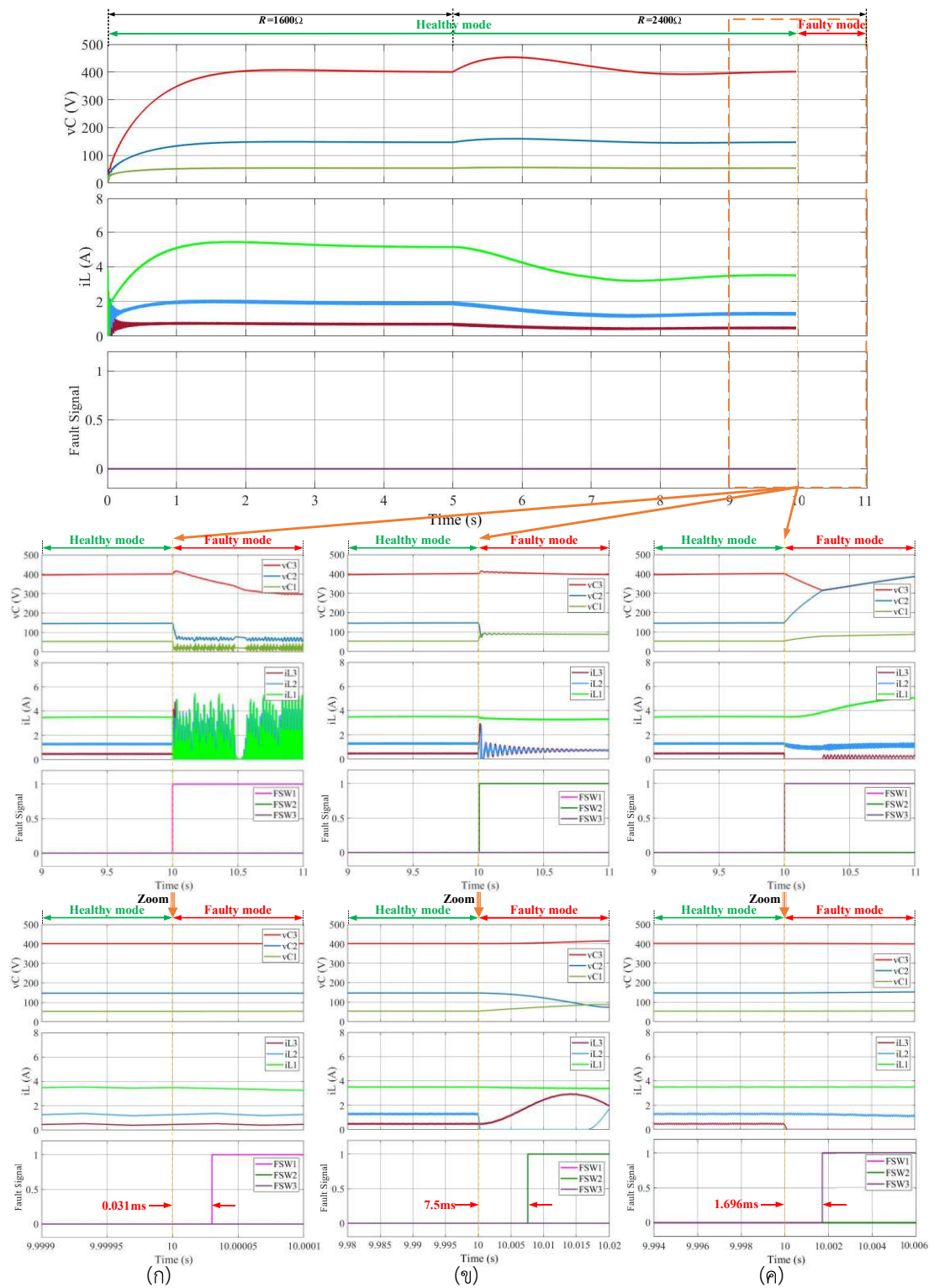
รูปที่ 5.44 ผลการตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรภายใต้การเพิ่มขึ้นของแรงดันอินพุต



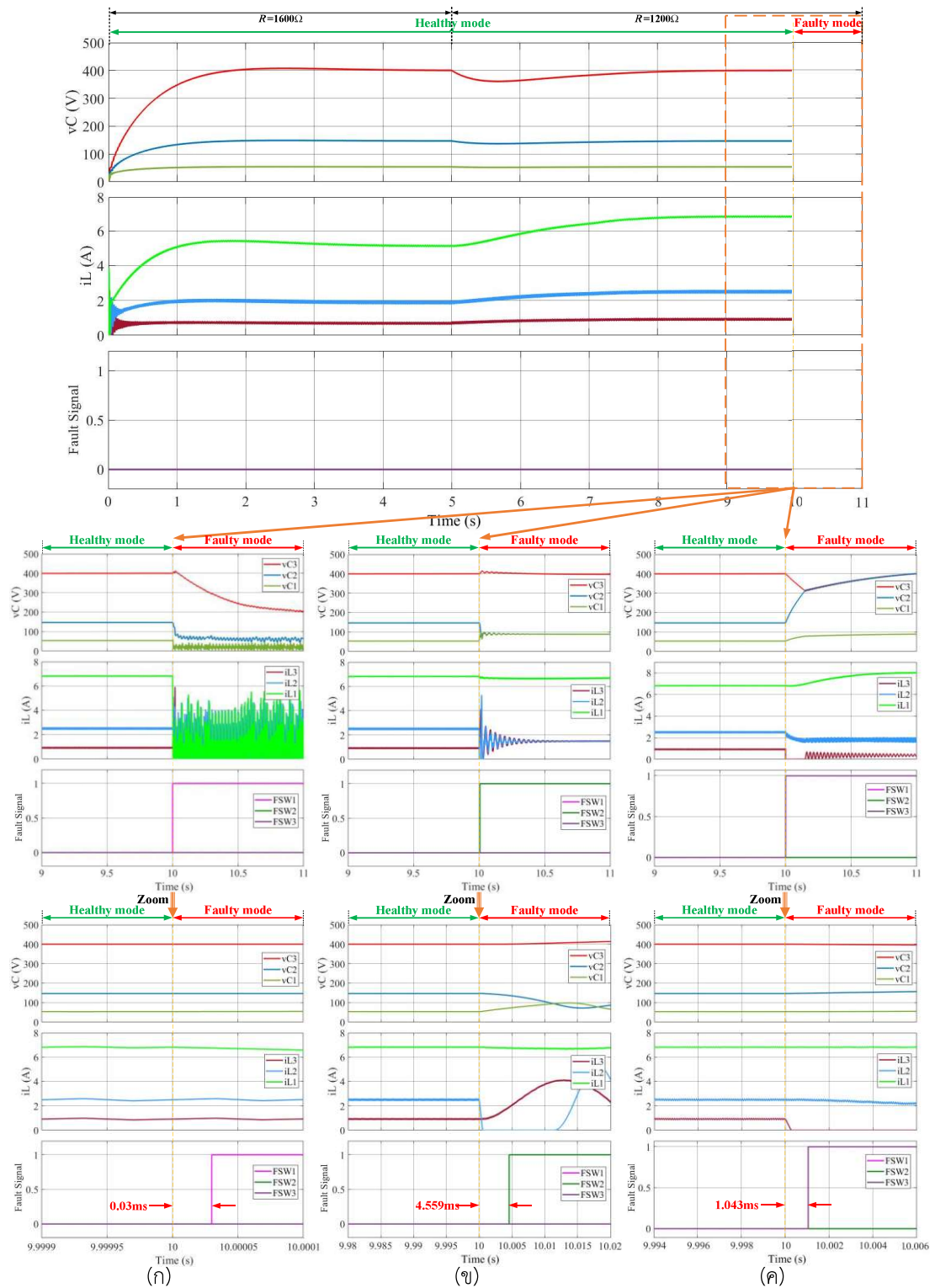
รูปที่ 5.45 ผลการตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรภายใต้การลดลงของแรงดันอินพุต



รูปที่ 5.46 ผลการตรวจจับความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรภายใต้การลดลงของแรงดันอ้างอิง



รูปที่ 5.47 ผลการตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรภายใต้การเพิ่มขึ้นของโหลดตัวต้านทาน



รูปที่ 5.48 ผลการตรวจจับความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรภายใต้การลดลงของโหลดตัวต้านทาน

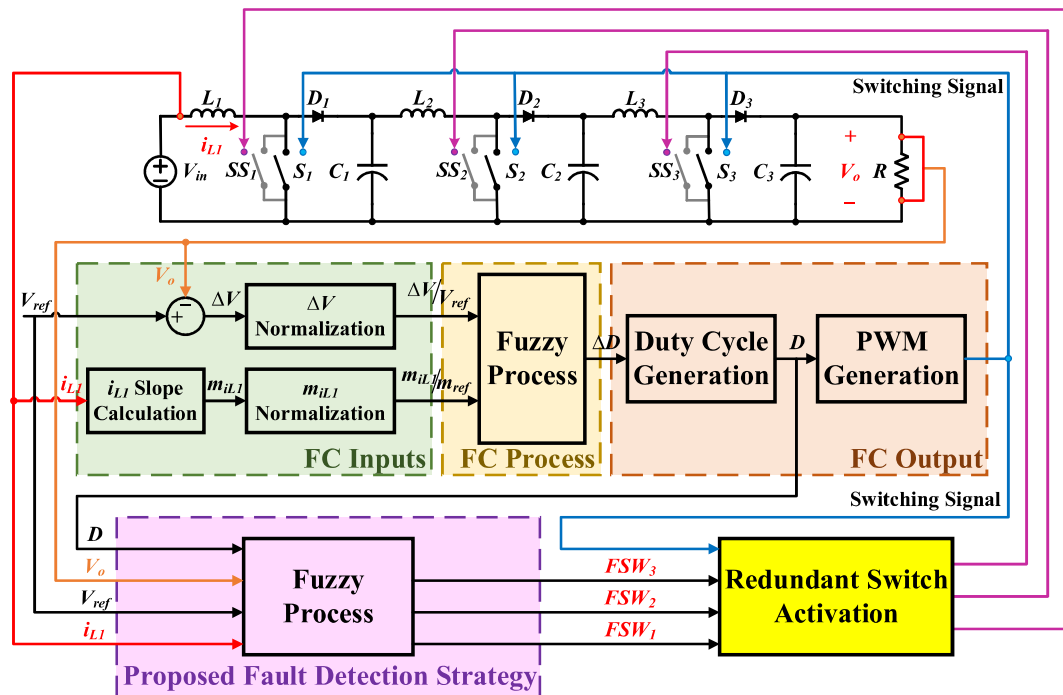
จากการจำลองสถานการณ์การตรวจจับความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรที่พัฒนาขึ้นสำหรับ วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นภายใต้การเปลี่ยนแปลงจุดการทำงานของวงจร จะ เห็นได้ว่าตัวตรวจจับความผิดพลาดสามารถตรวจจับ และสามารถระบุตำแหน่งที่เกิดความผิดพลาดได้ อย่างรวดเร็วและถูกต้อง อีกทั้งยังไม่มีผลผิดพลาด ในขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงจุดการทำงาน โดยผล การตรวจจับความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรที่พัฒนาขึ้นสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 5.6

ตารางที่ 5.6 ผลการตรวจจับความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรภายใต้การเปลี่ยนแปลงจุดการทำงาน

กรณี	การเปลี่ยนแปลงจุดการทำงาน	เวลาในการตรวจจับความผิดพลาด (ms)		
		S_1	S_2	S_3
1	เพิ่ม V_{in} จาก 20V เป็น 25V	0.024	9.239	0.978
2	ลด V_{in} จาก 20V เป็น 15V	0.068	7.5	2.642
3	ลด V_{ref} จาก 400V เป็น 200V	0.083	14.995	2.651
4	เพิ่ม R จาก 1600Ω เป็น 2400Ω	0.031	7.5	1.696
5	ลด R จาก 1600Ω เป็น 1200Ω	0.03	4.559	1.043

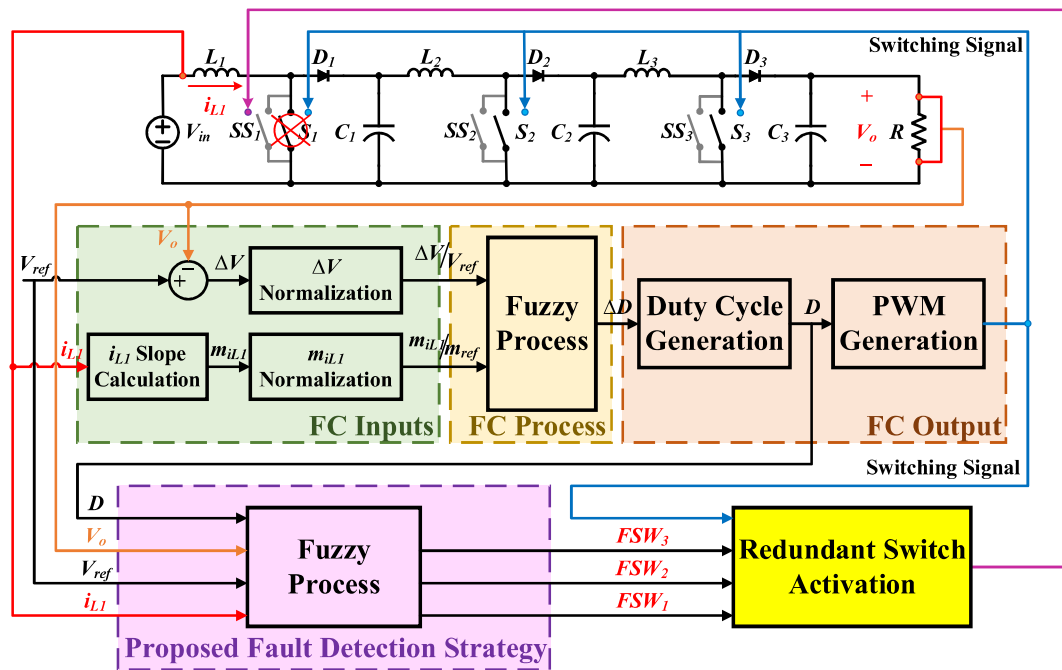
5.4.3 การจำลองสถานการณ์การทำงานของวงจรภายใต้สภาวะความคงทนต่อ ความผิดพลาด

ในหัวข้อนี้เป็นการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกัน สามขั้นภายใต้ตัวควบคุมฟัซซี่ที่มีคงทนต่อความผิดพลาด โดยพิจารณากรณีที่สวิตช์ตัวใดตัวหนึ่งเกิด ความผิดพลาดเท่านั้นดังรูปที่ 5.49 เมื่อตรวจพบว่าสวิตช์ตัวใดเกิดความผิดพลาดจะสั่งให้สวิตช์ตัวสำรอง (SS_1 , SS_2 , SS_3) ทำงานแทนทันที โดยอาศัยกระบวนการเปิดใช้งานสวิตช์สำรอง (Redundant switch activation) เพื่อให้วงจรสามารถทำงานต่อได้ด้วยสมรรถนะที่ดี ผลการจำลองสถานการณ์สามารถแบ่ง ออกเป็น 3 กรณี โดยพิจารณาผลของแรงดันตรรกะตัวเก็บประจุ กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ และ สถานะการตรวจจับความผิดพลาดทั้งสาม ทั้งสภาวะการทำงานปกติ (Healthy mode) สภาวะเกิด ความผิดพลาด (Faulty mode) และสภาวะความคงทนต่อความผิดพลาด (Fault-tolerant mode) ดังนี้

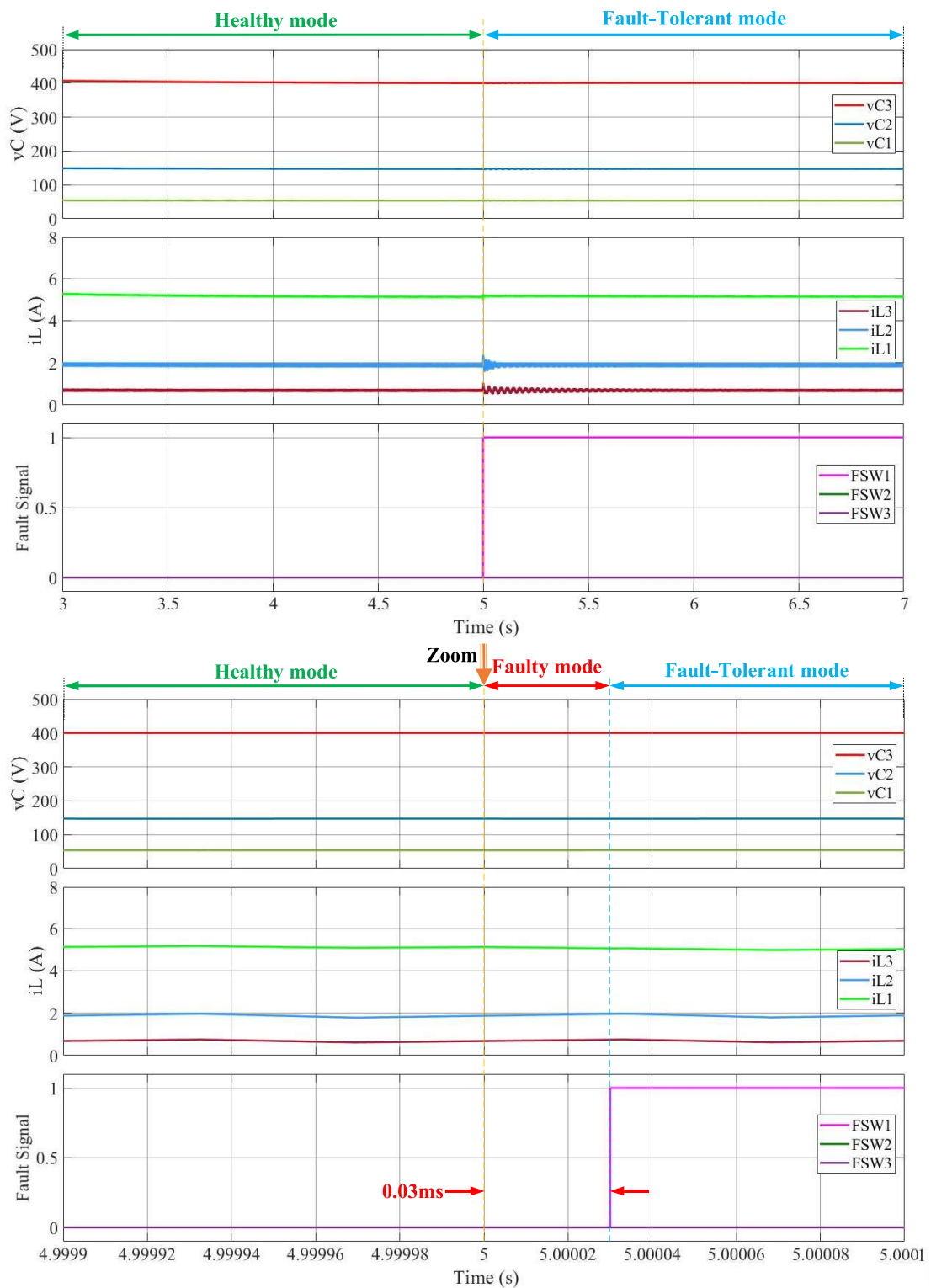


รูปที่ 5.49 โครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นที่มีความคงทนต่อความผิดปกติ

กรณีที่ 1 การจำลองสถานการณ์วงจรที่มีคงทนต่อความผิดปกติพร้อมแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_1 ซึ่งมีโครงสร้างวงจรสำหรับการจำลองสถานการณ์แสดงรูปที่ 5.50 เมื่อเกิดความผิดปกติพร้อมแบบสวิตช์เปิดวงจร ผลการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังรูปที่ 5.51 จากผลการจำลองสถานการณ์จะเห็นได้ว่าในเวลาช่วงเริ่มต้นถึงวินาทีที่ 5 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นทำงานเป็นปกติ วงจรสามารถเพิ่มระดับ V_{in} ที่มีแรงดันต่ำประมาณ 20V ให้มี V_o สูงถึงประมาณ 400V ต่อมาที่เวลาวินาทีที่ 5 เกิดความผิดปกติพร้อมแบบสวิตช์เปิดวงจรขึ้นที่ S_1 ส่งผลให้สามารถตรวจพบความผิดปกติพร้อมได้จากผลตอบสนองที่เกิดขึ้น ซึ่งแสดงได้จากสัญญาณ FSW_1 มีค่าเปลี่ยนจาก 0 เป็น 1 โดยใช้เวลาในการตรวจจับความผิดปกติพร้อมประมาณ 0.03ms หลังจากตรวจพบความผิดปกติพร้อมระบบควบคุมจะทำการส่งสัญญาณควบคุมการทำงานของสวิตช์ S_1 ไปให้สวิตช์สำรอง SS_1 เพื่อให้สวิตช์สำรองทำงานแทน จะสังเกตเห็นได้ว่าหลังจาก SS_1 ทำงานแทนที่ S_1 แล้ว วงจรยังคงสามารถรักษาระดับ V_o ให้มีค่าคงที่ได้ตามต้องการ เพื่อให้วงจรยังคงทำงานต่อไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ

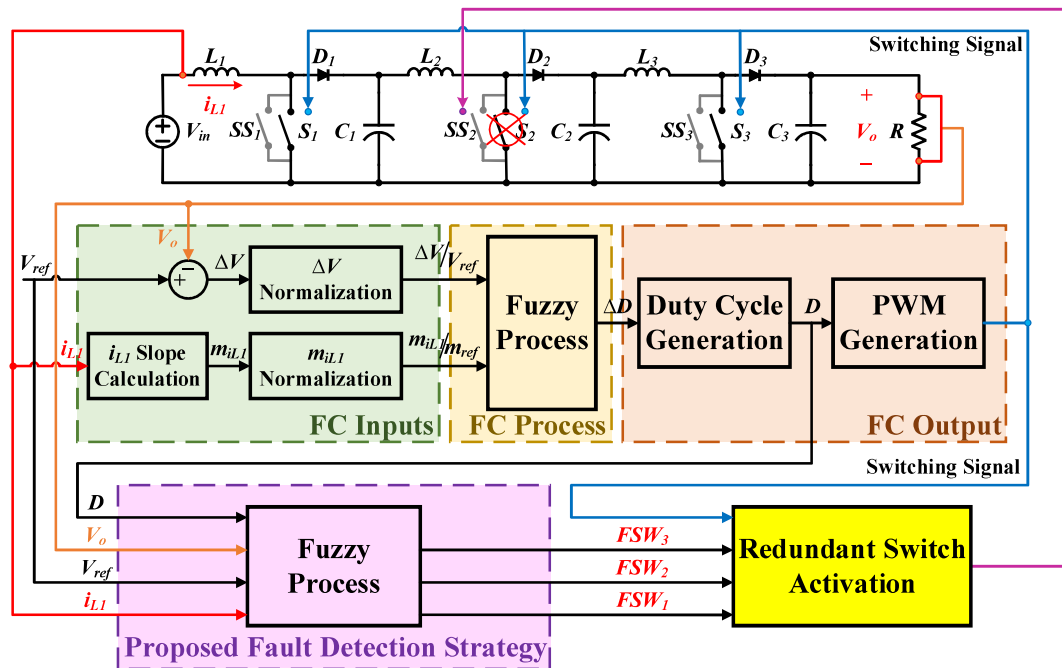


รูปที่ 5.50 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นที่มีคงทนต่อความผิดปกติที่ S_1

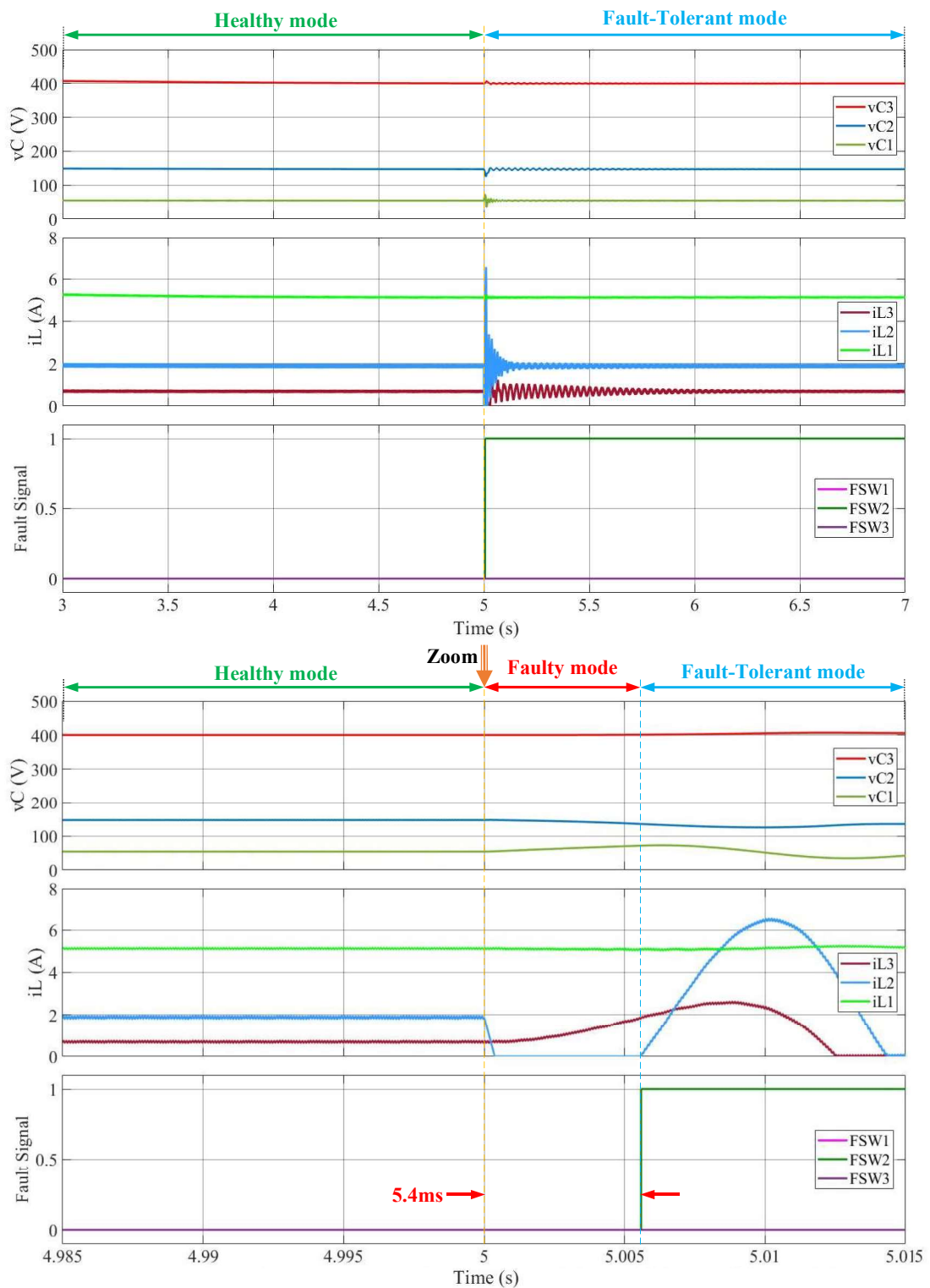


รูปที่ 5.51 ผลการจำลองกรณีเกิดความผิดปกติที่ S_1 ในสภาวะคงทนต่อความผิดปกติ

กรณีที่ 2 การจำลองสถานการณ์วงจรที่มีคงทนต่อความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_2 ซึ่งมีโครงสร้างวงจรสำหรับการจำลองสถานการณ์แสดงรูปที่ 5.52 เมื่อเกิดความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจร มีผลการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังรูปที่ 5.53 จากผลการจำลองสถานการณ์จะเห็นว่าเวลาวินาทีที่ 5 เกิดความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรขึ้นที่ S_2 ส่งผลให้สามารถตรวจพบความผิดปกติได้จากผลตอบสนองที่เกิดขึ้น ซึ่งแสดงได้จากสัญญาณความผิดปกติของสวิตช์ FSW_2 มีค่าเปลี่ยนจาก 0 เป็น 1 โดยใช้เวลาในการตรวจจับประมาณ 5.4ms หลังจากตรวจพบความผิดปกติ ระบบควบคุมจะทำการส่งสัญญาณควบคุมการทำงานของ S_2 ไปให้ SS_2 ทำงานแทน จะสังเกตเห็นได้ว่าวงจรยังคงสามารถรักษาระดับ V_o ให้มีค่าคงที่ได้ตามต้องการ เพื่อให้วงจรยังคงทำงานต่อไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม i_{L2} และ i_{L3} เกิดการพุ่งเกิน หลังจากนั้นกระแสถูกควบคุมให้มีค่าที่สอดคล้องกับค่า V_{ref} ที่ต้องการ

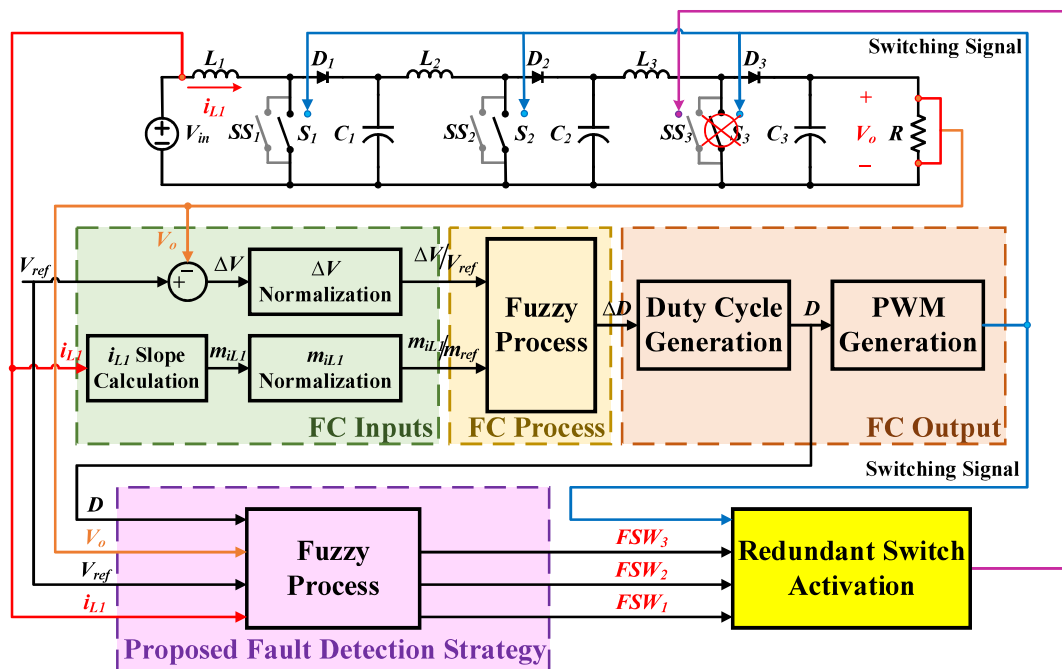


รูปที่ 5.52 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นที่มีคงทนต่อความผิดปกติที่ S_2

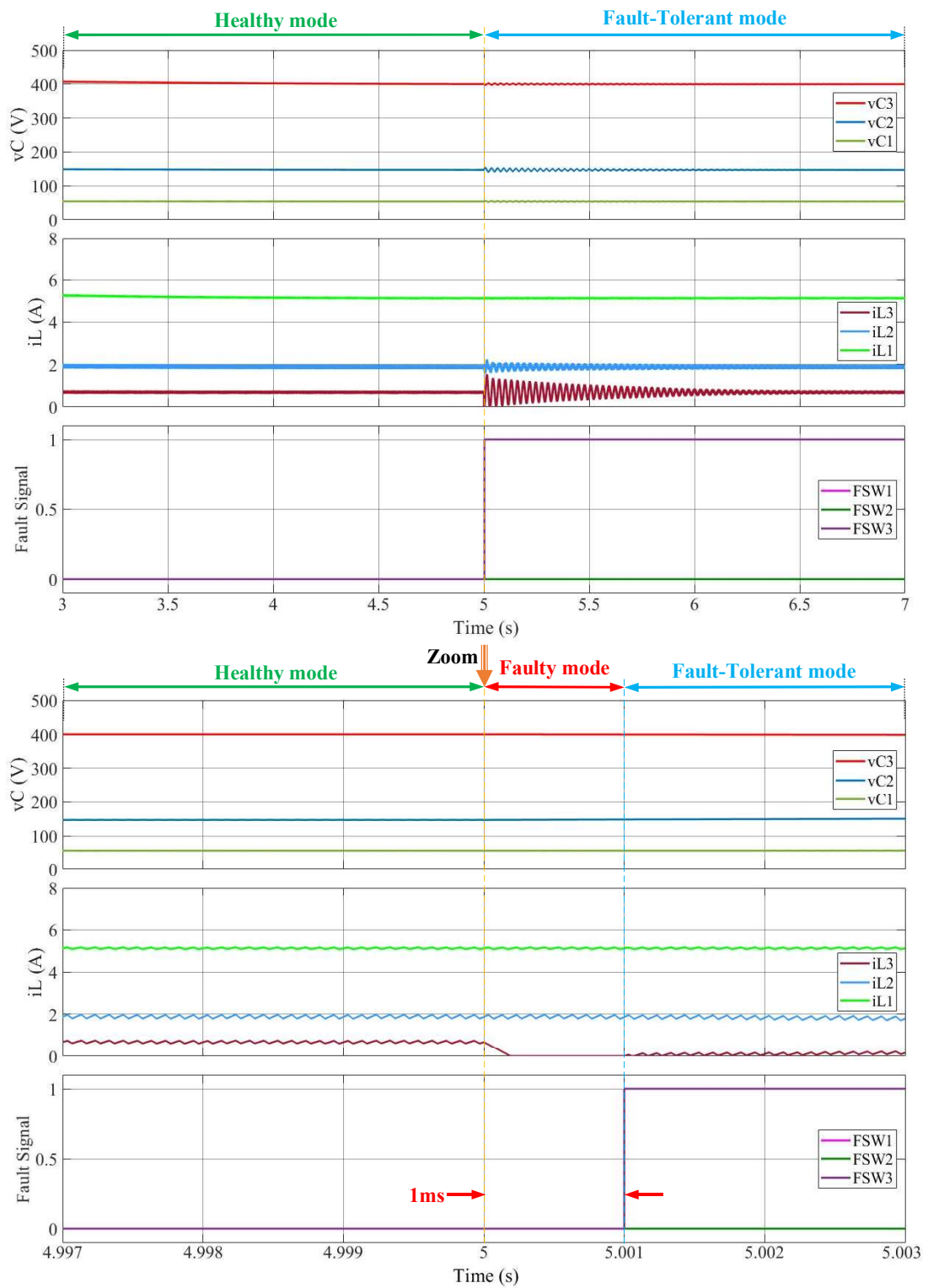


รูปที่ 5.53 ผลการจำลองกรณีเกิดความผิดปกติที่ S_2 ในสภาวะคงทนต่อความผิดปกติ

กรณีที่ 3 การจำลองสถานการณ์วงจรที่มีคงทนต่อความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_3 ซึ่งมีโครงสร้างวงจรสำหรับการจำลองสถานการณ์แสดงรูปที่ 5.54 มีผลการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังรูปที่ 5.55 จากผลการจำลองสถานการณ์จะเห็นได้ว่าที่เวลาวินาทีที่ 5 เกิดความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรขึ้นที่สวิตช์ S_3 สามารถตรวจพบความผิดพลาดได้จากผลตอบสนองที่เกิดขึ้น ซึ่งแสดงได้จากสัญญาณความผิดพลาดของสวิตช์ FSW_3 มีค่าเปลี่ยนจาก 0 เป็น 1 โดยใช้เวลาในการตรวจจับประมาณ 1ms หลังจากตรวจพบความผิดพลาดระบบควบคุมจะทำการส่งสัญญาณควบคุมการทำงานของสวิตช์ S_3 ไปให้สวิตช์สำรอง SS_3 ทำงานแทน จะสังเกตเห็นได้ว่าวงจรยังคงสามารถรักษาระดับ V_o ให้มีค่าคงที่ได้ตามต้องการ เพื่อให้วงจรยังคงทำงานต่อไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามค่ากระแส i_{L2} และ i_{L3} เกิดการสั่นไหว หลังจากนั้นกระแสถูกควบคุมให้มีค่าที่สอดคล้องกับตามค่า V_{ref} ที่ต้องการ



รูปที่ 5.54 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นที่มีคงทนต่อความผิดพลาดที่ S_3



รูปที่ 5.55 ผลการจำลองกรณีเกิดความผิดปกติที่ S_3 ในสภาวะคงทนต่อความผิดปกติ

จากผลการจำลองสถานการณ์ทั้ง 3 กรณี แสดงให้เห็นว่าการสร้างความคงทนต่อความผิดปกติที่พัฒนาขึ้นภายในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นภายใต้ตัวควบคุมฟuzzy สามารถตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_1 , S_2 และ S_3 ในสภาวะการทำงานปกติ จะเห็นได้ว่าวิธีการตรวจจับความผิดปกติที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจจับความผิดปกติ และสามารถระบุตำแหน่งที่เกิดความผิดปกติได้อย่างรวดเร็วและถูกต้อง โดยเมื่อตรวจพบว่าสวิตช์ตัวใดเกิดความผิดปกติจะสั่งให้สวิตช์ตัวสำรอง (SS_1 , SS_2 , SS_3) ทำงานแทนทันที ทำให้วงจรยังคงสามารถทำงานต่อไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5.5 สรุป

เนื้อหาในบทที่ 5 นี้กล่าวถึงการพัฒนาวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นขณะที่มีตัวควบคุมฟuzzyที่พัฒนาขึ้น ให้มีความคงทนต่อความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจร โดยเริ่มต้นจากการสังเกตพฤติกรรมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นขณะที่มีตัวควบคุมฟuzzyที่พัฒนาขึ้นทั้งในสภาวะปกติ และสภาวะเกิดความผิดปกติ เพื่อนำมาสร้างเงื่อนไขในการตรวจจับความผิดปกติของแต่ละสวิตช์ ในการสร้างความคงทนต่อความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรให้กับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น เพื่อให้สามารถระบุตำแหน่งความผิดปกติที่เกิดขึ้นในแต่ละสวิตช์ได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว ทำให้การกู้คืนการทำงานของวงจรจากความผิดปกติ โดยนำกระบวนการฟuzzyมาใช้ในกระบวนการสร้างความคงทนต่อความผิดปกติ เพื่อให้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นสามารถทำงานต่อไปได้เมื่อมีความผิดปกติเกิดขึ้นที่สวิตช์กำลังของวงจร ในกระบวนการตรวจจับความผิดปกติจะอาศัยกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่ 1 และแรงดันเอาต์พุต ที่ได้จากตัวตรวจจับกระแสและตัวตรวจจับแรงดันที่ใช้ในกระบวนการควบคุมฟuzzyที่พัฒนาขึ้น รวมถึงสัญญาณวัฏจักรหน้าที่ของสวิตช์ที่ได้จากควบคุมฟuzzyที่พัฒนาขึ้น ซึ่งให้ผลตอบสนองที่แตกต่างจากพฤติกรรมการทำงานของวงจรในสภาวะการทำงานปกติอย่างชัดเจน เมื่อเกิดความผิดปกติที่สวิตช์แต่ละตัว จากการจำลองสถานการณ์การตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรที่พัฒนาขึ้นสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นภายใต้การเปลี่ยนแปลงจุดการทำงานของวงจร จะเห็นได้ว่าตัวตรวจจับความผิดปกติสามารถตรวจจับ และสามารถระบุตำแหน่งที่เกิดความผิดปกติได้อย่างรวดเร็วและถูกต้อง อีกทั้งยังไม่มีผลผิดพลาดในขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงจุดการทำงาน และผลการจำลองสถานการณ์สุดท้ายเป็นการสร้างความ

คงทนต่อความผิดปกติ เพื่อให้งจรยังคงสามารถทำงานต่อไปได้อย่างมีประสิทธิภาพภายใต้ความผิดปกติที่เกิดขึ้น