

บทที่ 7

ผลการทดสอบ

7.1 บทนำ

บทนี้นำเสนอผลการทดสอบของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นดังที่นำเสนอการสร้างชุดทดสอบไว้ในบทที่ 6 โดยอาศัยค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ภายในวงจรที่ได้ออกแบบไว้ในบทที่ 3 และตัวควบคุมฟัซซีที่พัฒนาขึ้นเพื่อรักษาแรงดันให้คงที่ตามต้องการดังที่ได้นำเสนอในบทที่ 4 รวมถึงการตรวจจับความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจร และการสร้างความคงทนต่อความผิดปกติ โดยการสั่งให้สวิตช์สำรองทำงานแทนทันทีหลังจากตรวจพบความผิดปกติที่เกิดขึ้น เพื่อให้วงจรสามารถทำงานต่อไปได้อย่างมีประสิทธิภาพดังที่นำเสนอในบทที่ 5 ในการแสดงผลการทดสอบของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นจะทำการทดสอบภายใต้การเปลี่ยนแปลงจุดการทำงานของแรงดันอ้างอิง แรงดันอินพุต และโหลดตัวต้านทาน ทั้งนี้จะนำเสนอผลตอบสนองของการทำงานของวงจรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงจุดการทำงาน โดยพิจารณาจากแรงดันเอาต์พุต และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ เพื่อแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมฟัซซีที่พัฒนาขึ้นสามารถควบคุมให้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นให้สามารถรักษาระดับแรงดันตามต้องการได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวมถึงการแสดงผลการทดสอบของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นเมื่อเกิดความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรภายใต้การควบคุมฟัซซีที่พัฒนาขึ้น ทั้งนี้ผลการทดสอบจะแสดงการตรวจจับความผิดปกติ ต่อมาเป็นการระบุตำแหน่งความผิดปกติที่เกิดขึ้นโดยสามารถระบุตำแหน่งความผิดปกติที่เกิดขึ้นได้อย่างถูกต้อง และสุดท้ายเป็นการสร้างความคงทนต่อความผิดปกติ เพื่อให้วงจรยังคงสามารถทำงานต่อไปได้อย่างมีประสิทธิภาพภายใต้ความผิดปกติที่เกิดขึ้น

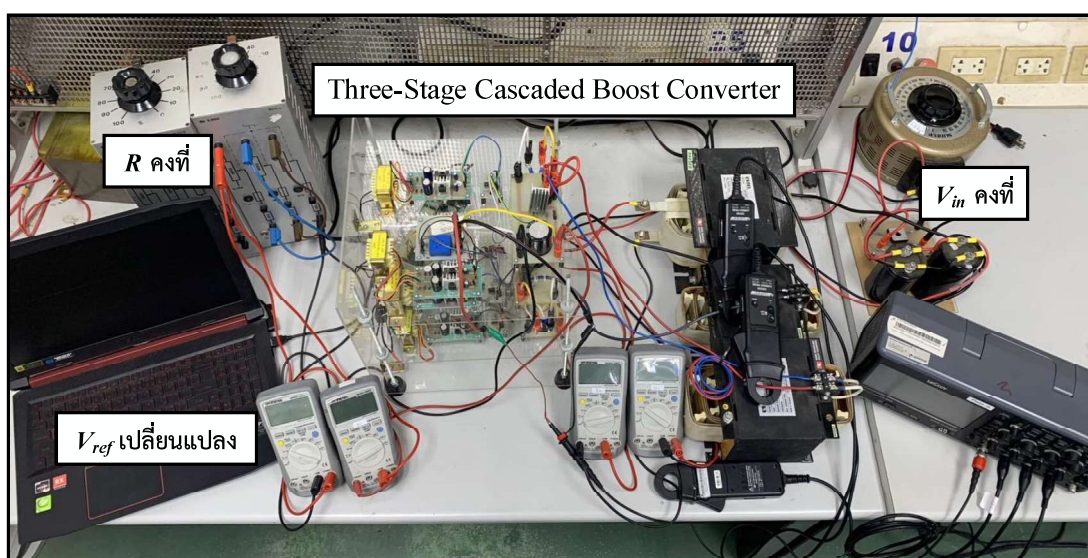
7.2 ผลการทดสอบชุดทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นโดยใช้ตัวควบคุมฟัซซีที่พัฒนาขึ้น

การควบคุมแรงดันเอาต์พุตด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น eZdspTMF28335 เพื่อสร้างสัญญาณการสวิตช์ทั้งสามตัว โดยอาศัยตัวควบคุมฟัซซีที่พัฒนาขึ้นทำการทดสอบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงจุดการทำงานแบ่งออกเป็น 3 กรณี ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิง แรงดันอินพุต

และโหลดตัวต้านทาน นอกจากนี้ยังได้แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทดสอบชุดทดสอบกับผลการจำลองสถานการณ์เพื่อแสดงให้เห็นถึงประสิทธิผลของตัวควบคุมฟัซซีที่พัฒนาขึ้นในการรักษาแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์เรียงต่อกันสามขั้นให้คงที่ตามต้องการ รายละเอียดการทดสอบวงจรในแต่ละกรณีแสดงดังต่อไปนี้

7.2.1 กรณีมีการปรับเปลี่ยนแรงดันอ้างอิง

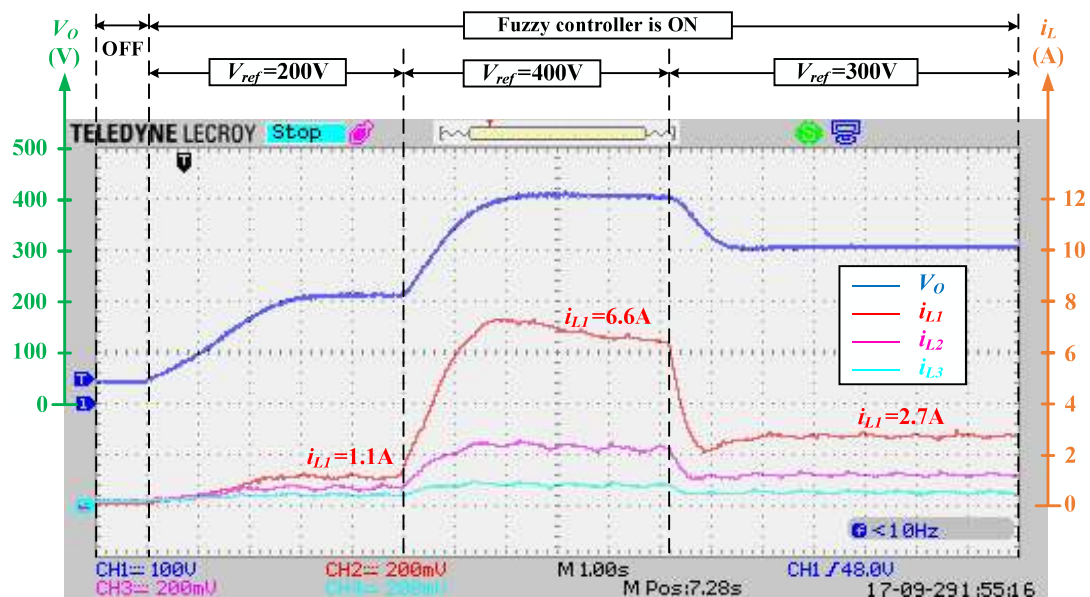
การทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์เรียงต่อกันสามขั้นเมื่อมีการปรับเปลี่ยนแรงดันอ้างอิง จะอาศัยชุดทดสอบที่แสดงดังรูปที่ 7.1 ในการทดสอบจะกำหนดให้แรงดันอ้างอิงเปลี่ยนแปลงซึ่งจะอาศัยการตั้งค่าแรงดันอ้างอิงโดยการโปรแกรมลงในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น eZdspTMF28335 โดยแรงดันอ้างอิงจะเปลี่ยนแปลงจาก 200V เป็น 400V หลังจากนั้นเปลี่ยนเป็น 300V ส่วนแรงดันอินพุตจ่ายให้กับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์เรียงต่อกันสามขั้นคงที่ประมาณ 20V และโหลดตัวต้านทานมีขนาดคงที่ประมาณ 1600Ω ผลการทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์เรียงต่อกันสามขั้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิงแสดงได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 7.1 ชุดทดสอบวงจรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิง

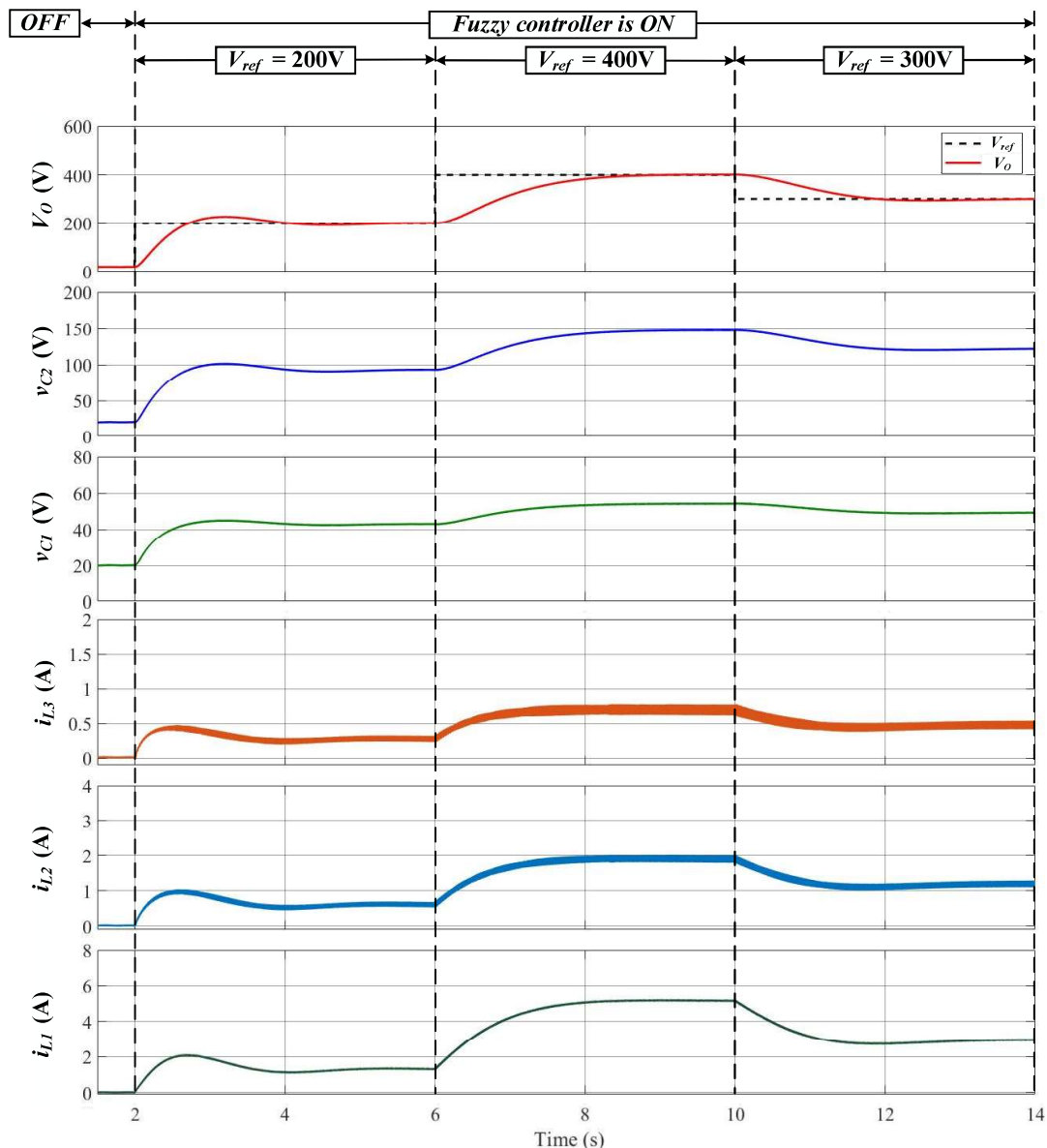
ผลการทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์เรียงต่อกันสามขั้นเมื่อมีการปรับเปลี่ยนแรงดันอ้างอิงแสดงดังรูปที่ 7.2 จะเห็นได้ว่าในขณะที่ยังคงค่า V_{in} ที่ 20V และ R ที่ 1600Ω การทดสอบจะเปลี่ยนค่า V_{ref} เป็น 200V, 400V และ 300V โดยขณะที่เริ่มต้นการทำงานของวงจรค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ จะมีการการพุ่งเกินเล็กน้อย หลังจากนั้นตัวควบคุมฟัซซีสามารถควบคุม V_o ให้คงที่ 200V โดยเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวภายในเวลาประมาณ 2.8s ส่วน i_{L1} เพิ่มขึ้นตามค่าแรงดันและคงที่ที่

ประมาณ 1.1A จะเห็นว่าตัวควบคุมฟัซซีที่พัฒนาขึ้นสามารถควบคุมค่า i_{L1} ให้มีค่าความชันตาม m_{ref} ตามกฎฟัซซีที่กำหนดไว้ ต่อจากนั้นที่วินาทีที่ 5 ค่าแรงดัน V_{ref} เปลี่ยนจาก 200V เป็น 400V จะเห็นว่าตัวควบคุมเพิ่มระดับ V_o และ i_{L1} จากเริ่มต้นไปยังสภาวะอยู่ตัวเป็นเวลาประมาณ 1.9s โดยที่มีค่าประมาณ 400 V และ 6.6A ตามลำดับ หลังจากนั้น V_{ref} ถูกลดลงเป็น 300V และตัวควบคุมฟัซซีควบคุม V_o ไปสู่สภาวะอยู่ตัวใหม่ในเวลาประมาณ 1.2 s



รูปที่ 7.2 ผลการทดสอบวงจรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิง

จากผลการทดสอบวงจรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิงรูปที่ 7.2 เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ดังรูปที่ 7.3 พบว่าผลการจำลองสถานการณ์มีความสอดคล้องกับผลการทดสอบชุดทดสอบ แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบฮาร์ดแวร์ต่อกันสามชั้นภายใต้ตัวควบคุมฟัซซีที่พัฒนาขึ้นที่สามารถควบคุม และรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตตามต้องการ

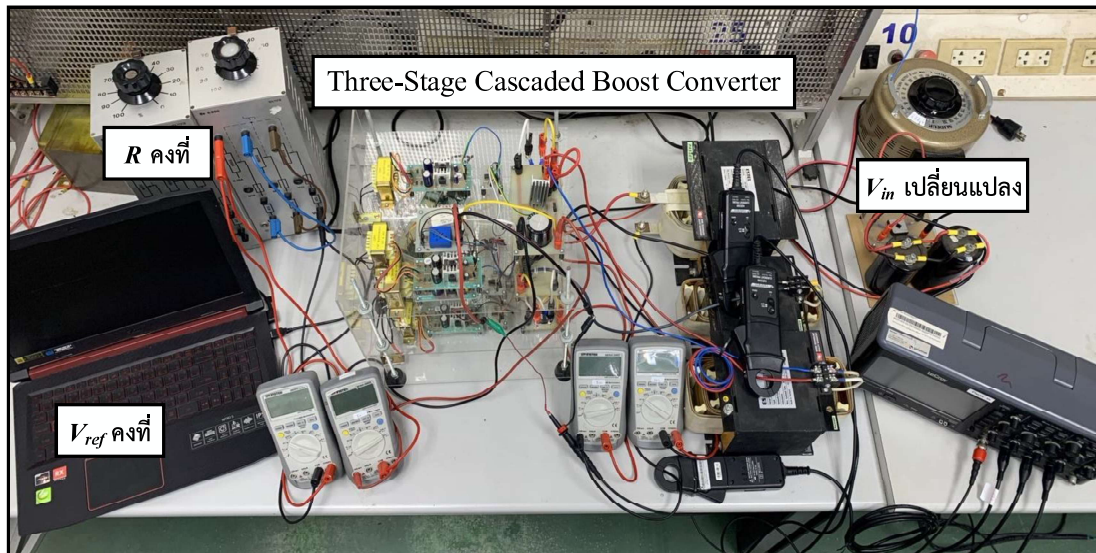


รูปที่ 7.3 ผลการจำลองสถานการณ์วงจรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิง

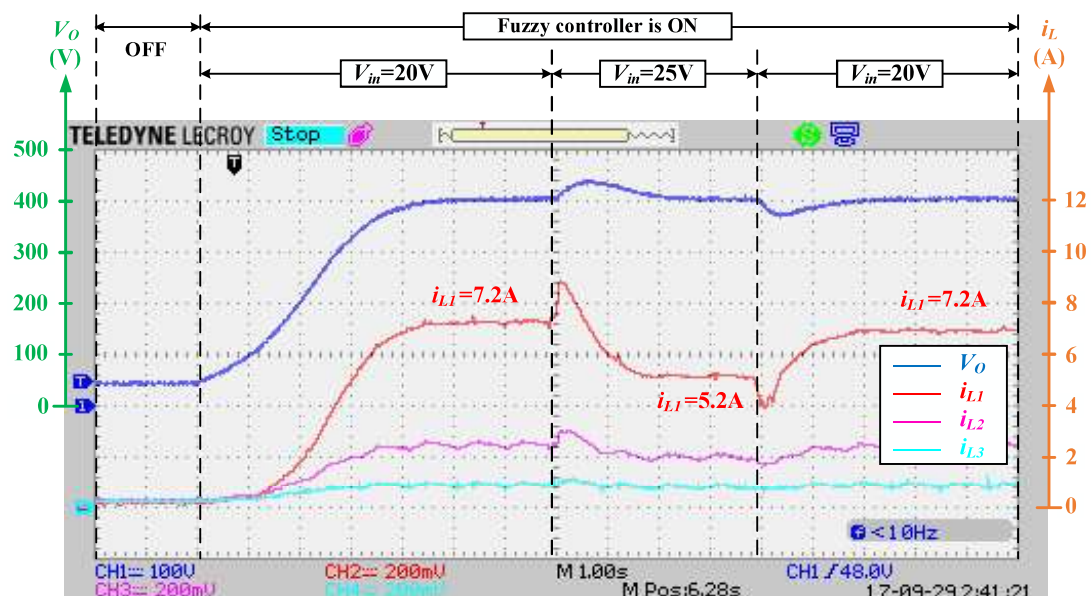
7.2.2 กรณีที่มีการปรับเปลี่ยนแรงดันอินพุต

การทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นเมื่อมีการปรับเปลี่ยนแรงดันอินพุต จะอาศัยชุดทดสอบที่แสดงดังรูปที่ 7.4 ในการทดสอบจะปรับให้แรงดันอินพุตเปลี่ยนแปลง ซึ่งจะอาศัยการปรับวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับชุดทดสอบที่มีหม้อแปลงปรับแรงดันหนึ่งเฟส ให้ได้แรงดันอินพุตเพิ่มขึ้นจาก 20V เป็น 25V หลังจากนั้นปรับแรงดันอินพุตลดลงจาก 25V เป็น 20V โดยที่ค่าแรงดันอ้างอิง และโหลดตัวต้านทานมีค่าคงที่ตลอดการทดสอบที่ 400V

และ 1600Ω ตามลำดับ ผลการทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตแสดงได้ดังต่อไปนี้



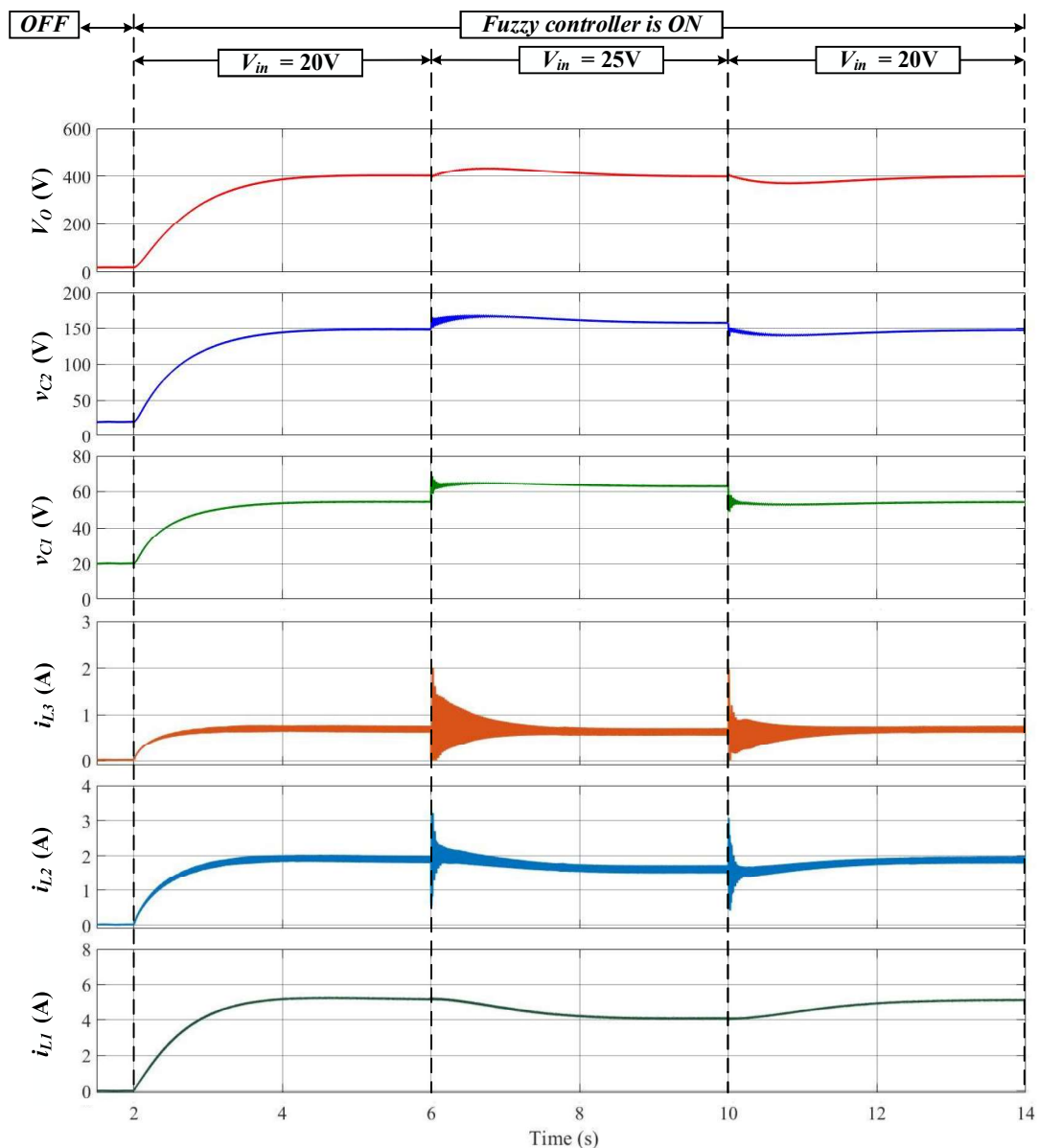
รูปที่ 7.4 ชุดทดสอบวงจรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต



รูปที่ 7.5 ผลการทดสอบวงจรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต

ผลการทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นเมื่อมีการปรับเปลี่ยนแรงดันอินพุตแสดงดังรูปที่ 7.5 จะพบว่าในช่วงเริ่มต้นการทำงานของวงจรแปลงผัน

กำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น โดยมีแหล่งจ่ายแรงดัน V_{in} ที่ 20V จากรูปแสดงค่า V_O เพิ่มขึ้นจาก 20V ไปยังแรงดันอ้างอิงคือ 400V ภายในระยะเวลาประมาณ 4.2s ในเวลาเดียวกัน i_{L1} เพิ่มขึ้น และคงที่ประมาณ 7.2A ที่สภาวะอยู่ตัว หลังจากนั้น V_{in} ถูกเปลี่ยน 20V เป็น V_{in} 25V ในการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันอินพุตส่งผลให้ทั้ง i_{L1} และ V_O เกิดการพุ่งเกินในช่วงเริ่มต้น จากนั้นตัวควบคุมฟัซซี่ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของวงจรอย่างมีประสิทธิภาพโดยสามารถรักษา V_O ยังคงอยู่ที่ 400V และ i_{L1} มีค่าสภาวะอยู่ตัวประมาณ 5.2A ต่อมา V_{in} ถูกลดลงจาก 25V ไปยัง 20V ที่เวลา 10s ทำให้ i_{L1} และ V_O ลดลง จะเห็นได้ว่าตัวควบคุมฟัซซี่สามารถควบคุมการทำงานของวงจรอย่างรวดเร็ว โดยที่ i_{L1} และ V_O กลับเข้าสู่สภาวะคงตัวครั้งที่ โดยใช้เวลาประมาณ 1.6 s

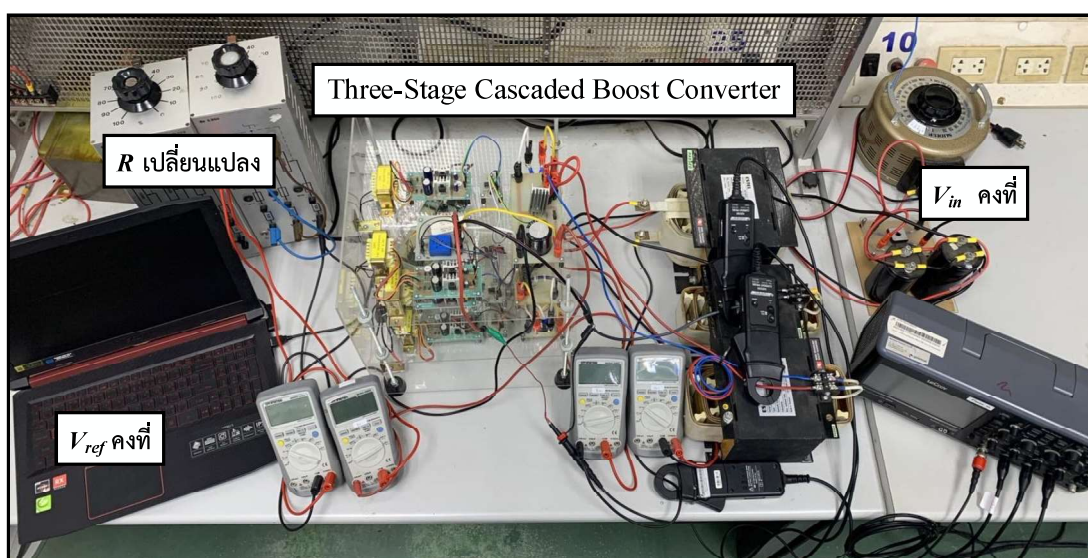


รูปที่ 7.6 ผลการจำลองสถานการณ์วงจรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต

จากผลการทดสอบวงจรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตดังรูปที่ 7.5 เมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ดังรูปที่ 7.6 พบว่าผลการจำลองสถานการณ์มีความสอดคล้องกับผลการทดสอบชุดทดสอบ แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นภายใต้ตัวควบคุมฟัซซีที่พัฒนาขึ้น ที่สามารถควบคุม และรักษาระดับแรงดันตามแรงดันอ้างอิงที่ 400V

7.2.3 กรณีมีการปรับเปลี่ยนโหลดตัวต้านทาน

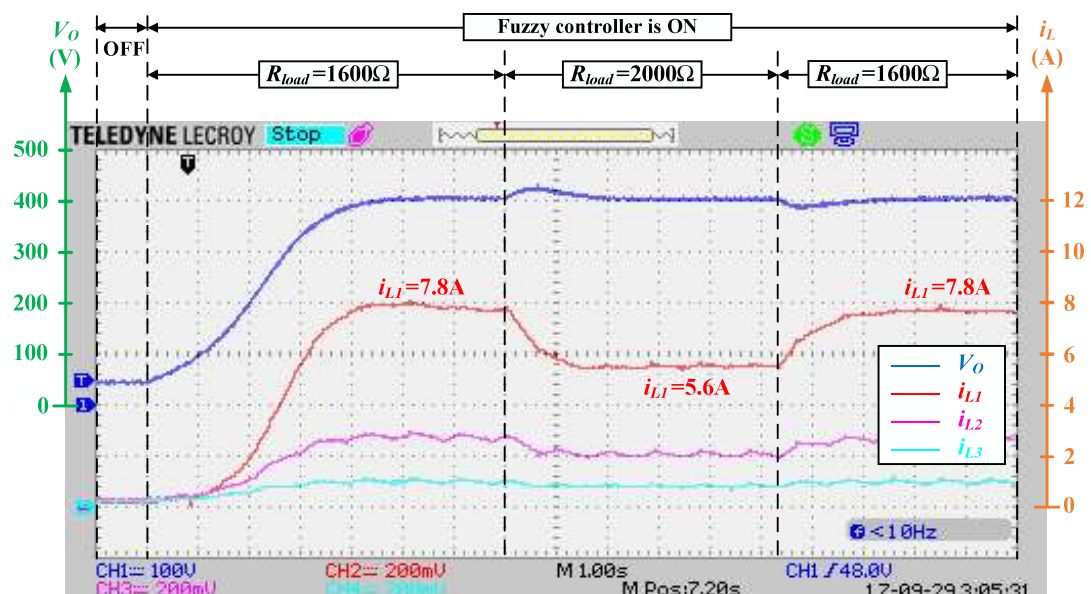
การทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นเมื่อมีการปรับเปลี่ยนโหลดตัวต้านทาน ซึ่งแสดงถึงค่ากำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงโดยอาศัยชุดทดสอบที่แสดงดังรูปที่ 7.7 ในการทดสอบจะปรับให้โหลดตัวต้านทานให้ได้ค่าความต้านทานเพิ่มขึ้นจาก 1600Ω เป็น 2000Ω หลังจากนั้นปรับโหลดตัวต้านทานลดลงจาก 2000Ω เป็น 1600Ω โดยที่ค่าแรงดันอ้างอิง และแรงดันอินพุตมีค่าคงที่ตลอดการทดสอบที่ 400V และ 20V ตามลำดับ ผลการทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทานแสดงได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 7.7 ชุดทดสอบวงจรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทาน

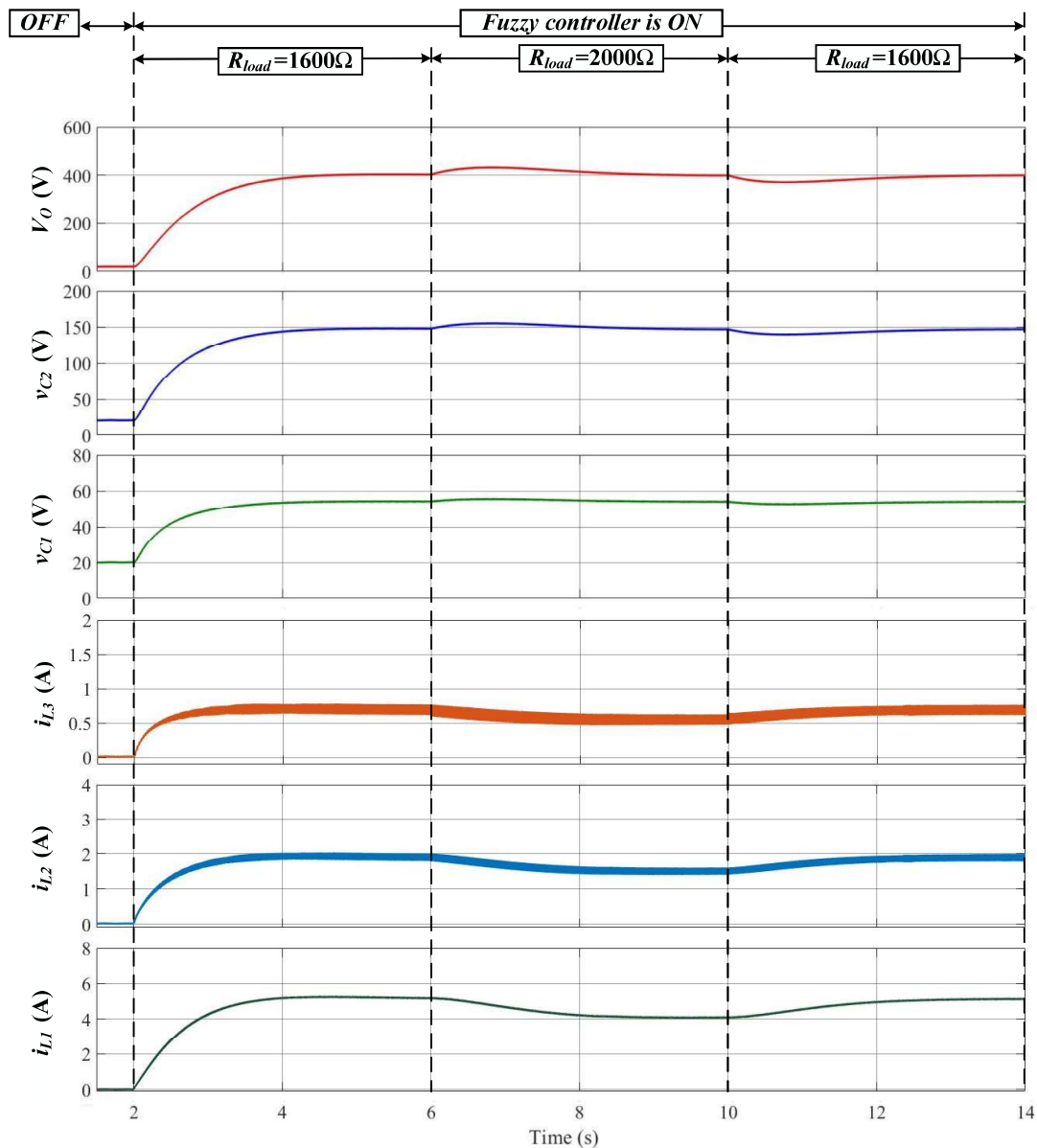
ผลการทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นเมื่อมีการปรับเปลี่ยนโหลดตัวต้านทานแสดงดังรูปที่ 7.8 จะเห็นได้ว่าในช่วงเริ่มต้นตัวควบคุมฟัซซีที่พัฒนาขึ้นสามารถควบคุมแรงดัน V_o จาก 20V ของแรงดันอินพุตเป็น 400V เท่ากับแรงดันอ้างอิงที่สภาวะอยู่ตัว ซึ่งใช้เวลาประมาณ 4.2s ส่วน i_{L1} เพิ่มขึ้น และคงที่ที่ประมาณ 7.8A จากนั้นโหลดตัวต้านทานถูกปรับเพิ่มจาก 1600Ω เป็น 2000Ω ส่งผลให้ V_o เกิดการพุ่งเกิน โดยตัวควบคุมฟัซซีสามารถตอบสนองควบคุม V_o

ให้โหลดลงเข้าหา V_{ref} ที่ 400V อีกทั้งยังควบคุมให้ i_{L1} เข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ 5.6A หลังจากนั้นโหลดตัวต้านทานถูกเปลี่ยนจาก 2000Ω เป็น 1600Ω ส่งผลให้แรงดัน V_o ลดลง จากนั้นตัวควบคุมฟัซซี่จะควบคุมแรงดัน V_o ให้เข้าสู่ V_{ref} ที่ 400 V ส่วน i_{L1} มีค่าประมาณ 7.8A ที่สภาวะอยู่ตัวโดยใช้เวลาประมาณ 1.4s



รูปที่ 7.8 ผลการทดสอบวงจรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทาน

จากการเปรียบเทียบผลการทดสอบวงจรจริง กับผลการจำลองสถานการณ์ดังที่แสดงในรูปที่ 7.8 และ 7.9 ตามลำดับ พบว่าทั้งสองผลลัพธ์มีความสอดคล้องกัน ซึ่งยืนยันประสิทธิภาพของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นภายใต้การควบคุมฟัซซี่ในการรักษาระดับแรงดันอ้างอิงที่ 400V แม้ว่าโหลดตัวต้านทานจะมีการเปลี่ยนแปลง

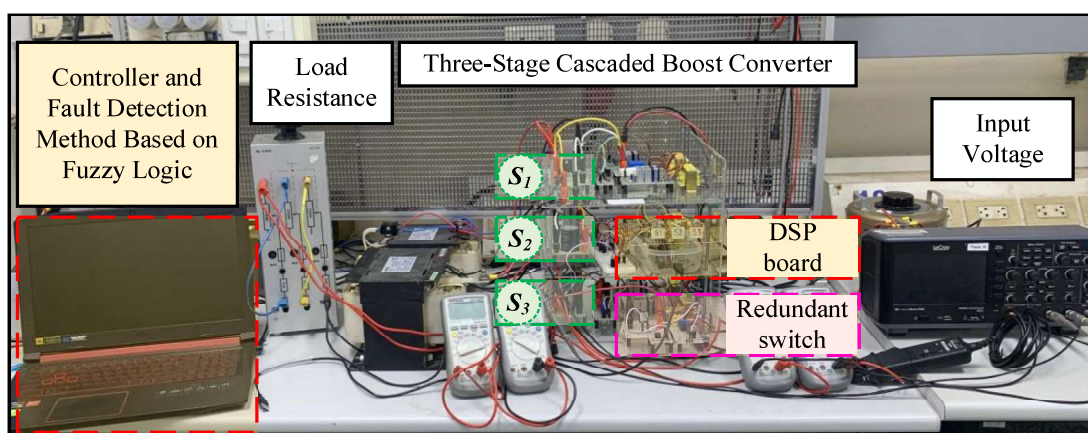


รูปที่ 7.9 ผลการจำลองสถานการณ์วงจรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทาน

ผลการทดสอบชุดทดลองที่มีตัวควบคุมฟัซซีภายใต้การเปลี่ยนแปลงของแรงดันอ้างอิง แรงดันอินพุต และโหลดตัวต้านทาน เมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ พบว่ามีความสอดคล้องกันทั้งในสถานะชั่วคราวและสถานะอยู่ตัว ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของตัวควบคุมฟัซซีในการรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้น

7.3 ผลการทดสอบวงจรที่มีความคงทนต่อความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจร

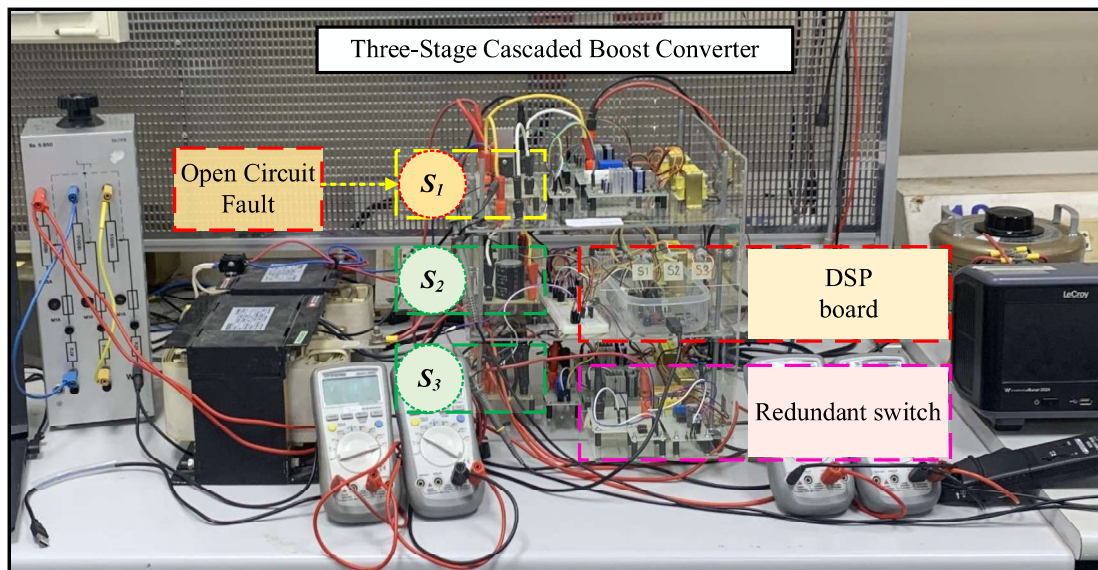
การทดสอบวงจรเมื่อเกิดความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรจะทำงานร่วมกันกับการควบคุมแรงดันเอาต์พุตด้วยการเขียนโปรแกรมลงบอร์ดไมโครคอนโทรเลอร์ DSP รุ่น eZdspTMF28335 แสดงดังรูปที่ 7.10 เพื่อสร้างสัญญาณการสวิตช์ทั้งสามตัว สำหรับรักษาแรงดันเอาต์พุตตามต้องการ โดยใช้ตัวควบคุมฟัซซี่ที่พัฒนาขึ้น รวมถึงการสร้าง ความคงทนต่อความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ได้พัฒนาขึ้นในบทที่ 5 โดยการทดสอบแบ่งออกเป็น 3 กรณี คือการทดสอบวงจรเมื่อเกิดความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_1 , S_2 และ S_3 ตามลำดับ โดยขั้นตอนการทดสอบแต่ละกรณีจะประกอบไปด้วยการตรวจจับความผิดปกติที่สามารถระบุตำแหน่งความผิดปกติที่เกิดขึ้นได้อย่างถูกต้อง และการสร้างความคงทนต่อความผิดปกติ เมื่อเกิดความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจร จะดำเนินการตรวจจับความผิดปกติโดยอาศัยวิธีการตรวจจับความผิดปกติที่พัฒนาขึ้น หลังจากนั้นจะสั่งให้สวิตช์สำรองทำงานทันที โดยใช้สัญญาณสถานะความผิดปกติเพื่อให้วงจรยังคงสามารถทำงานต่อไปได้อย่างมีประสิทธิภาพภายใต้ความผิดปกติที่เกิดขึ้น โดยทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการจำลองสถานการณ์เพื่อแสดงประสิทธิภาพของวิธีการตรวจจับความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรที่พัฒนาขึ้น



รูปที่ 7.10 ชุดทดสอบวงจรที่มีความคงทนต่อความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจร

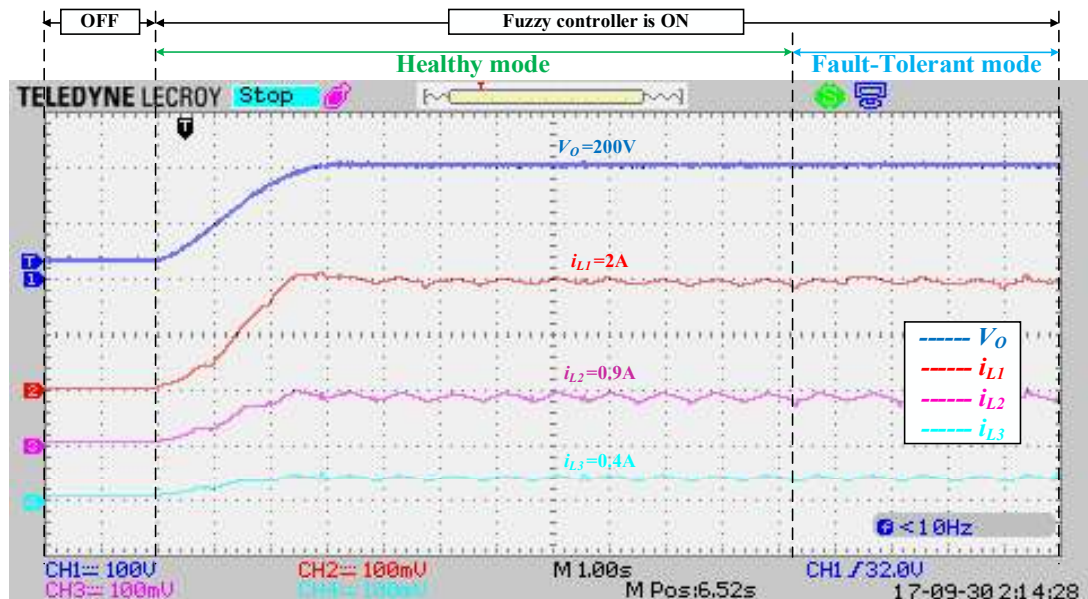
7.3.1 กรณีเกิดความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_1

การทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นเมื่อเกิดความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_1 จะอาศัยชุดทดสอบที่แสดงดังรูปที่ 7.11 ในการทดสอบจะกำหนดให้แรงดันอ้างอิงคงที่ 200V ซึ่งจะอาศัยการตั้งค่าแรงดันอ้างอิงโดยการโปรแกรมลงในบอร์ดไมโครคอนโทรเลอร์ DSP รุ่น eZdspTMF28335 ส่วนแรงดันอินพุตจ่ายให้กับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นคงที่ประมาณ 20V และโหลดตัวต้านทานมีขนาดคงที่ประมาณ 1600Ω



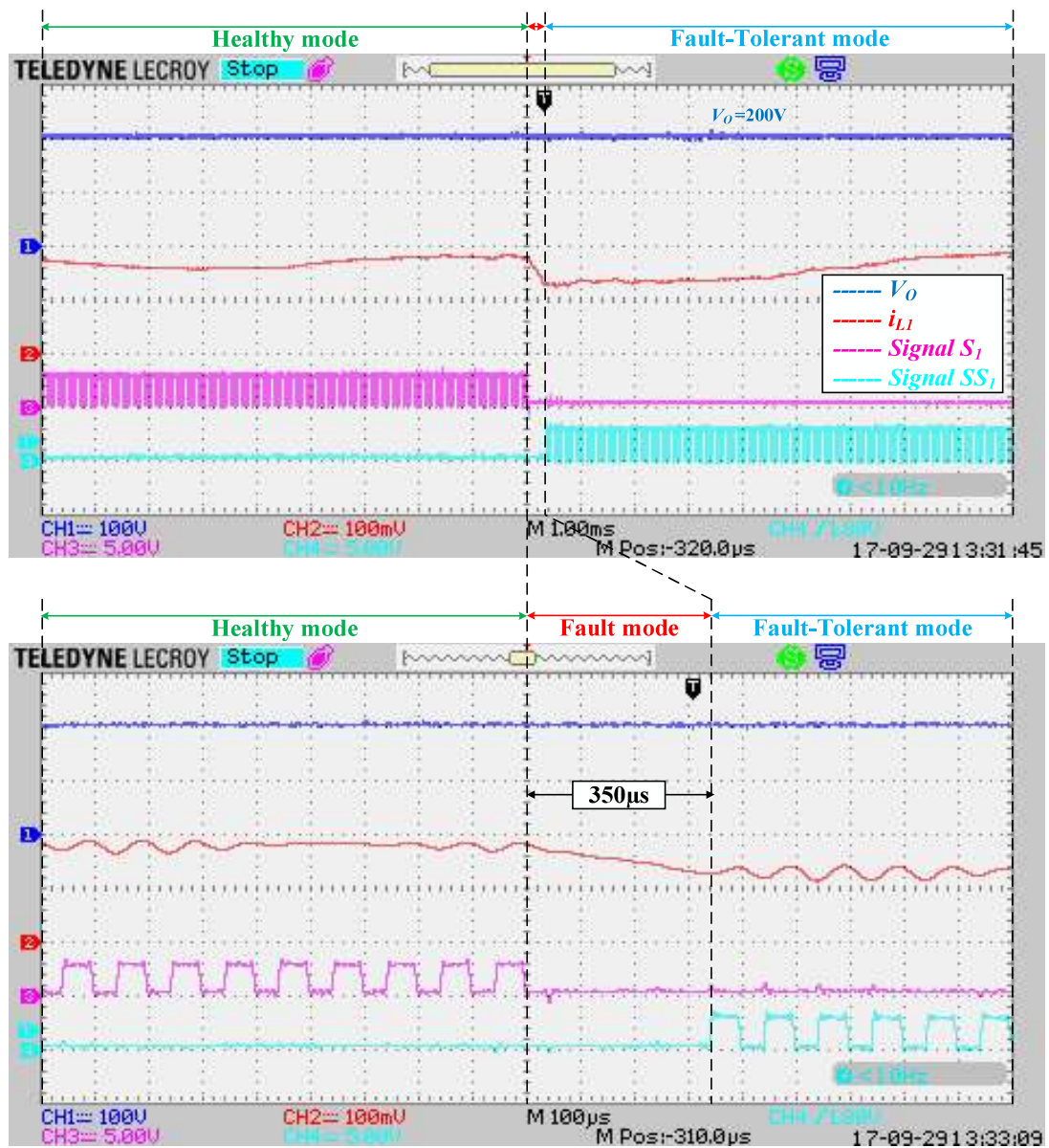
รูปที่ 7.11 ชุดทดสอบวงจรเมื่อเกิดความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_1

ผลการทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นเมื่อเกิดความผิดพลาดกับการสวิตช์วงจรที่ S_1 แสดงให้เห็นในรูปที่ 7.12, 7.13 และ 7.14 รูปที่ 7.12 แสดงแรงดันเอาต์พุต และกระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามในช่วงโหมดปกติ ตั้งแต่เริ่มต้นการทำงานจนกระทั่งเกิดความผิดพลาด สังเกตได้ว่าตัวควบคุมฟัซซี่ที่พัฒนาขึ้นสามารถรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตได้สูงสุดที่ 200V และกระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำ i_{L1} , i_{L2} และ i_{L3} เพิ่มขึ้น โดยมีค่าประมาณ 2A, 0.9A และ 0.4A ตามลำดับ หลังจากนั้นที่เวลาประมาณ 11.2s เกิดความผิดพลาดที่สวิตช์ S_1 จะสังเกตได้ว่าแรงดันเอาต์พุต และกระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามไม่เปลี่ยนแปลง เนื่องจากสามารถตรวจจับได้อย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นได้ส่งสัญญาณการสวิตช์ไปยังสวิตช์สำรอง SS_1 ให้ทำงานทันทีเมื่อตรวจพบความผิดพลาดดังกล่าว

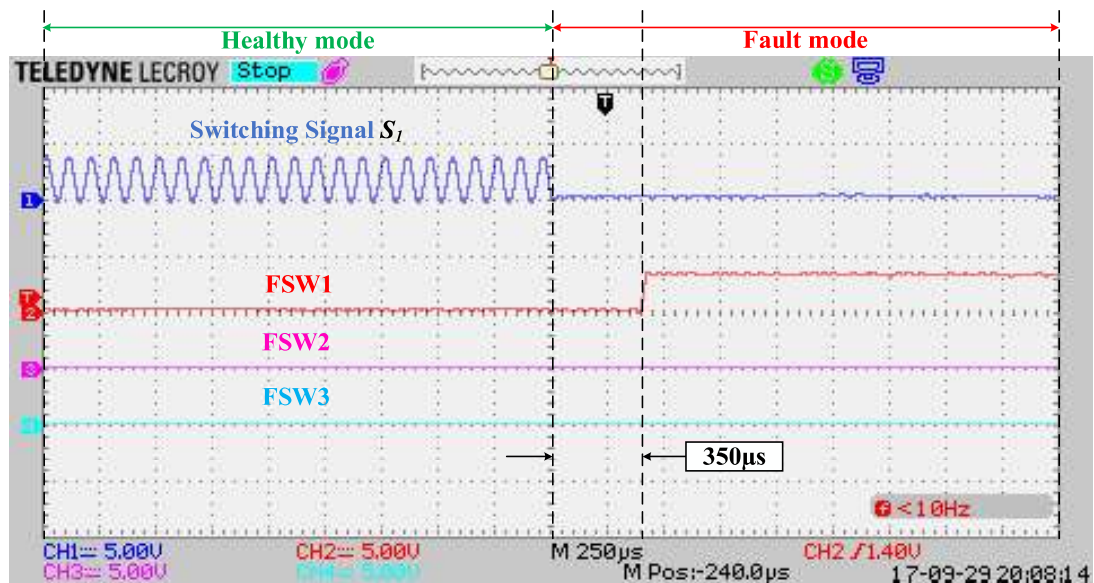


รูปที่ 7.12 ผลการทดสอบวงจรเมื่อเกิดความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_1

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบวงจรรูปที่ 7.13 แสดงค่าแรงดันเอาต์พุต และกระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่หนึ่ง สัญญาณสวิตช์ S_1 และสัญญาณสวิตช์สำรอง SS_1 สังเกตเห็นว่าในช่วงสภาวะปกติ ก่อนเกิดความผิดพลาด แรงดันเอาต์พุต กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่หนึ่ง และสัญญาณการสวิตช์ที่ S_1 ทำงานตามปกติอยู่ในสภาวะอยู่ตัว หลังจากเกิดความผิดพลาด ส่งผลให้กระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่หนึ่ง i_{L1} ลดลงทันที เมื่อใช้วิธีการตรวจจับความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_1 ที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจจับความผิดพลาดได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว จากนั้นดำเนินการส่งสัญญาณการสวิตช์ให้กับสวิตช์สำรอง SS_1 ทำงานแทน นอกจากนี้ผลการทดสอบในรูปที่ 7.14 แสดงสัญญาณสวิตช์ของ S_1 และสัญญาณตรวจจับความผิดพลาดของสวิตช์ทั้งสามตัว (FSW_1 , FSW_2 , FSW_3) ซึ่งพบว่าในช่วงสภาวะปกติก่อนเกิดความผิดพลาด สัญญาณสวิตช์ S_1 ยังคงมีสัญญาณพัลส์ปกติ ส่วนสัญญาณตรวจจับความผิดพลาดของสวิตช์ทั้งสามตัวยังคงค่าเป็นศูนย์ แต่หลังจากเกิดความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_1 โดยสัญญาณสวิตช์ S_1 จะมีค่าเป็นศูนย์ ส่วนสัญญาณตรวจจับความผิดพลาดของสวิตช์ที่ S_1 (FSW_1) จะแสดงค่าเป็น 1 ผลตอบสนองที่เกิดขึ้นจึงส่งผลให้สามารถตรวจจับความผิดพลาดได้ และส่งสัญญาณการสวิตช์ให้กับสวิตช์สำรอง SS_1 ทำงานแทนดังแสดงในรูปที่ 7.14 ในกระบวนการตรวจจับความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_1 จะใช้เวลาเพียง $350\mu s$ หรือ $0.35ms$ ส่งผลให้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นทำงานได้อย่างต่อเนื่องอย่างมีประสิทธิภาพในโหมดความคงทนต่อความผิดพลาด (Fault-tolerant mode)

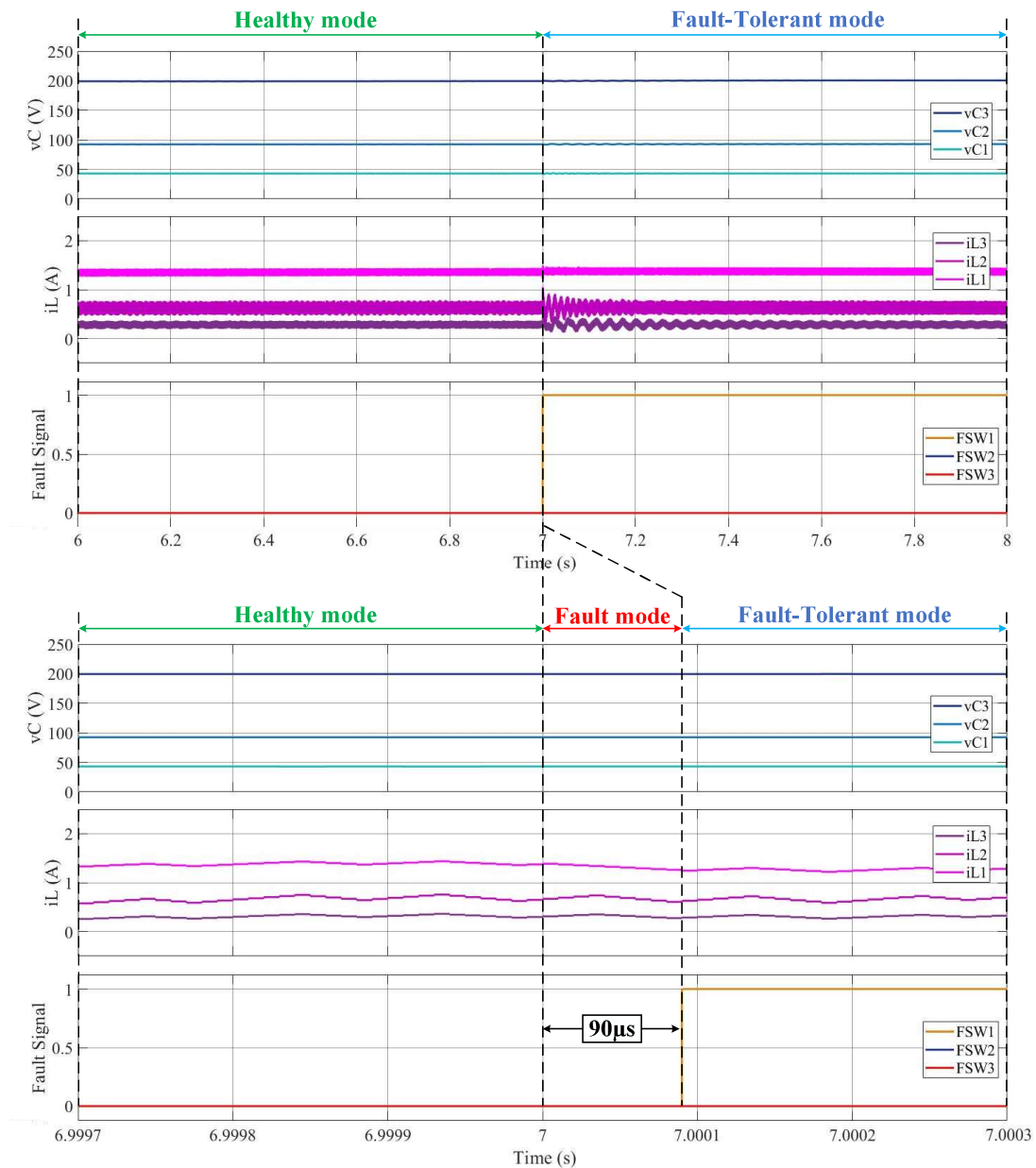


รูปที่ 7.13 ค่าแรงดันเอาต์พุต กระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่หนึ่ง และสัญญาณการสวิตช์เมื่อเกิด
ความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_1



รูปที่ 7.14 สัญญาณการสวิตช์ และสัญญาณการตรวจจับความผิดปกติเมื่อเกิดความผิดปกติแบบ
สวิตช์เปิดวงจรที่ S_1

จากผลการทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นเมื่อเกิดความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_1 ที่ได้แสดงไว้ข้างต้นเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 7.15 พบว่าผลการจำลองสถานการณ์สามารถตรวจจับความผิดปกติได้อย่างรวดเร็วกว่าผลการทดสอบโดยใช้เวลาประมาณ 90 μs หรือ 0.09ms ซึ่งความคลาดเคลื่อนนี้อาจเกิดจากอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในชุดทดสอบ และตัวตรวจจับกระแส อย่างไรก็ตามผลการจำลองสถานการณ์ยังคงมีความสอดคล้องกับผลการทดสอบชุดทดสอบ แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการสร้างความทนต่อความผิดปกติที่สามารถตรวจจับความผิดปกติที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและถูกต้อง ทำให้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นสามารถทำงานอย่างต่อเนื่องในโหมดความทนต่อความผิดปกติ (Fault-tolerant mode) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

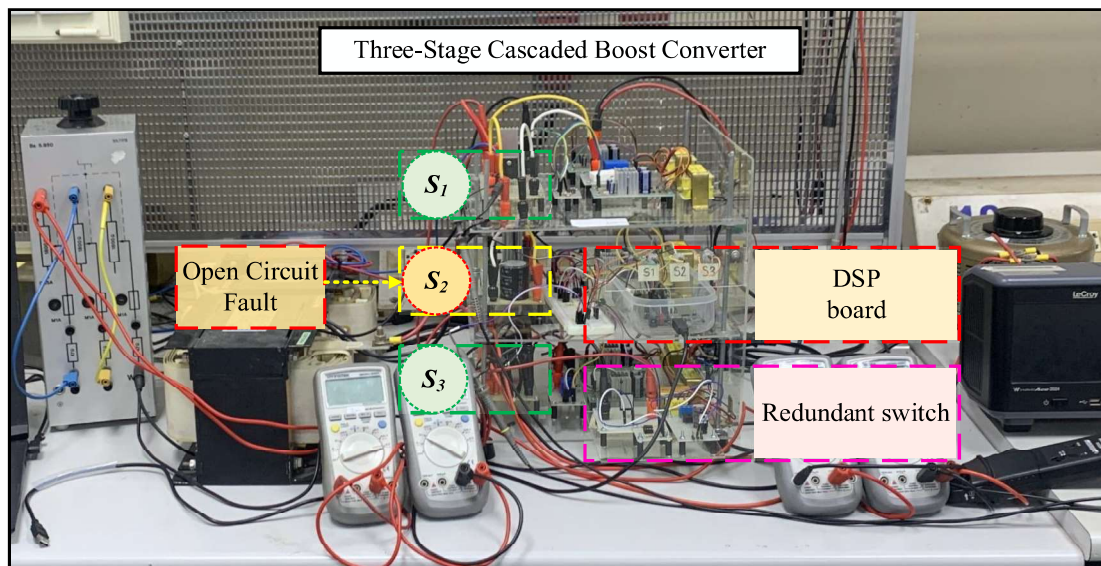


รูปที่ 7.15 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อเกิดความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_1 ภายใต้สภาวะคงทนต่อความผิดพลาด

7.3.2 กรณีเกิดความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_2

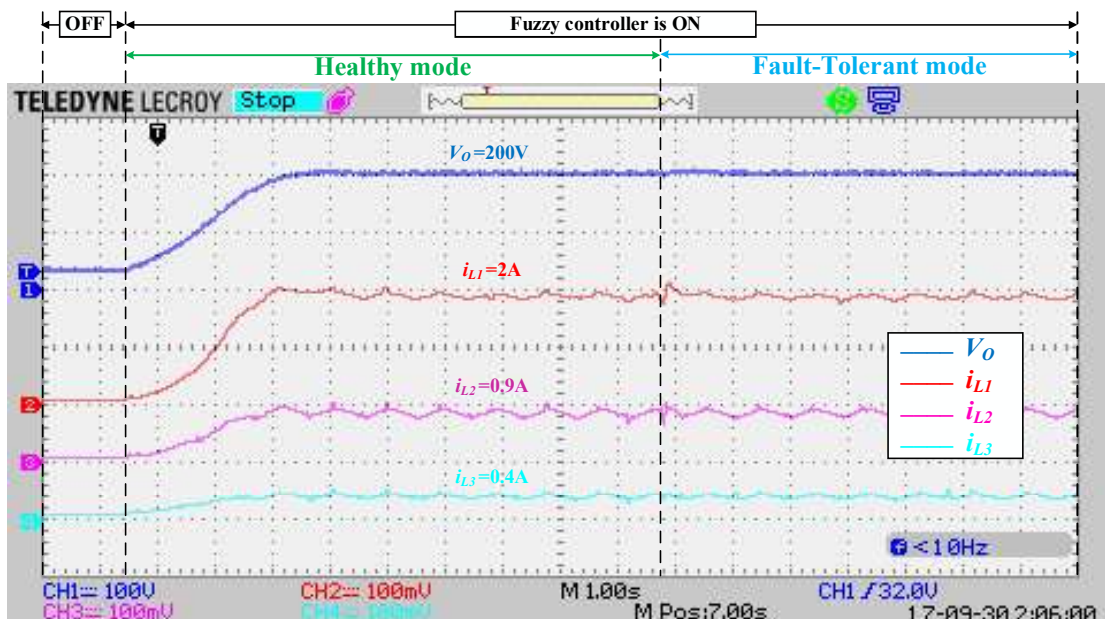
การทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นเมื่อเกิดความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_2 จะอาศัยชุดทดสอบที่แสดงดังรูปที่ 7.16 ในการทดสอบจะกำหนดให้แรงดันอ้างอิงคงที่ 200 V ซึ่งจะอาศัยการตั้งค่าแรงดันอ้างอิงโดยการโปรแกรมลงในบอร์ดไมโครคอน

โพรเซสเซอร์ DSP รุ่น eZdspTMF28335 ส่วนแรงดันอินพุตจ่ายให้กับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นคั้งที่ประมาณ 20V และโหลดตัวต้านทานมีขนาดคั้งที่ประมาณ 1600Ω



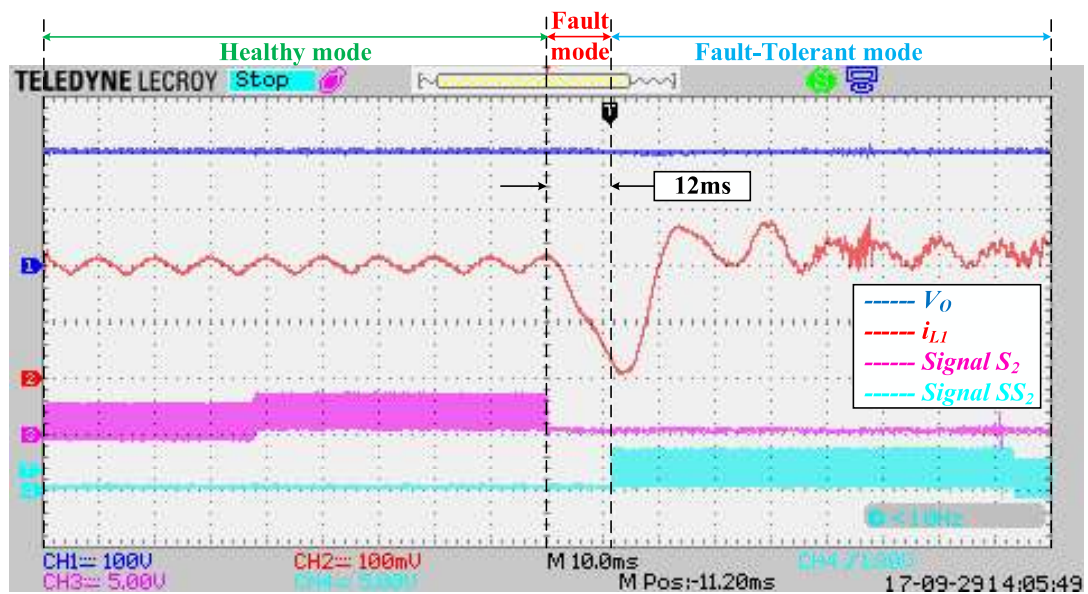
รูปที่ 7.16 ชุดทดสอบวงจรเมื่อเกิดความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_2

ผลการทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นเมื่อเกิดความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_2 ถูกแสดงในภาพที่ 7.17, 7.18 และ 7.19 โดยรูปที่ 7.17 แสดงค่าแรงดันเอาต์พุต และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวของชุดทดสอบวงจรในโหมดการทำงานปกติ (Healthy Mode) ตั้งแต่ชุดทดสอบเริ่มทำงานจะเห็นว่าตัวควบคุมสามารถเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุต และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำได้ตามที่ต้องการ หลังจากนั้นเมื่อเกิดความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_2 จะสังเกตได้ว่าค่าแรงดันเอาต์พุต และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย สามารถตรวจจับความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_2 และส่งสัญญาณการสวิตช์ให้กับสวิตช์สำรอง SS_2 ทำงานทันทีเมื่อตรวจพบความผิดปกติได้

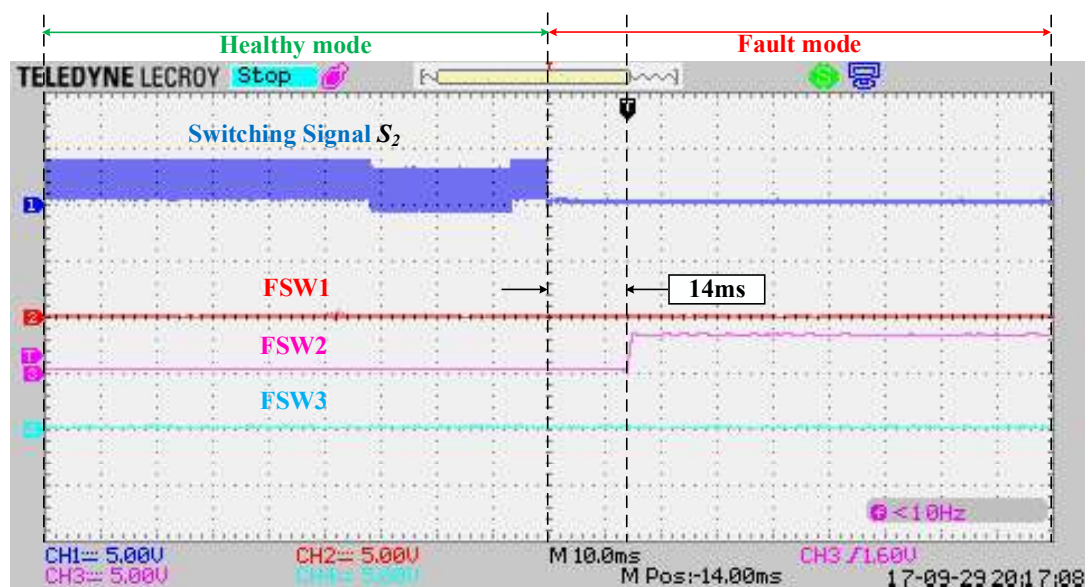


รูปที่ 7.17 ผลการทดสอบวงจรเมื่อเกิดความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_2

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบวงจรในรูปที่ 7.18 ซึ่งแสดงค่าแรงดันเอาต์พุต และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่หนึ่ง และสัญญาณการสวิตช์ S_2 และสัญญาณการสวิตช์สำหรับสวิตช์สำรอง SS_2 จะเห็นว่าในสถานะปกติก่อนเกิดความผิดปกติ แรงดันเอาต์พุต กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่หนึ่ง และสัญญาณการสวิตช์ที่ S_2 ทำงานตามปกติอยู่ในสถานะอยู่ตัว หลังจากเกิดความผิดปกติ กระแส i_{L1} มีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด ทำให้ความชัน $m_{i_{L1}}$ มีค่าติดลบ ซึ่งผลตอบสนองดังกล่าวเป็นตัวบ่งชี้ถึงกระบวนการตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_2 ที่ทำได้ทันที และส่งสัญญาณการสวิตช์ให้กับสวิตช์สำรอง SS_2 เพื่อทำหน้าที่แทน เมื่อพิจารณาผลการทดสอบวงจรในรูปที่ 7.19 ซึ่งแสดงสัญญาณการสวิตช์ S_2 และสัญญาณการตรวจจับความผิดปกติ FSW_1 , FSW_2 และ FSW_3 พบว่าในสถานะปกติก่อนเกิดความผิดปกติ สัญญาณการสวิตช์ S_2 ยังคงมีสัญญาณพัลส์ปกติ ส่วนสัญญาณการตรวจจับความผิดปกติของสวิตช์ทั้งสามตัวมีค่าเป็นศูนย์ หลังจากเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_2 พบว่าสัญญาณการสวิตช์ S_2 จะมีค่าเป็นศูนย์ ส่วนสัญญาณการตรวจจับความผิดปกติ FSW_1 , FSW_2 และ FSW_3 จะมีค่าเป็น 0, 1 และ 0 ตามลำดับ ซึ่งแสดงถึงการเกิดความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_2 และส่งสัญญาณการสวิตช์ให้กับสวิตช์สำรอง SS_2 เพื่อทำหน้าที่แทน ในกระบวนการตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_2 จะใช้ระยะเวลาประมาณ 12ms ซึ่งทำให้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นทำงานได้ต่อเนื่องอย่างมีประสิทธิภาพในโหมดความคงทนต่อความผิดปกติ



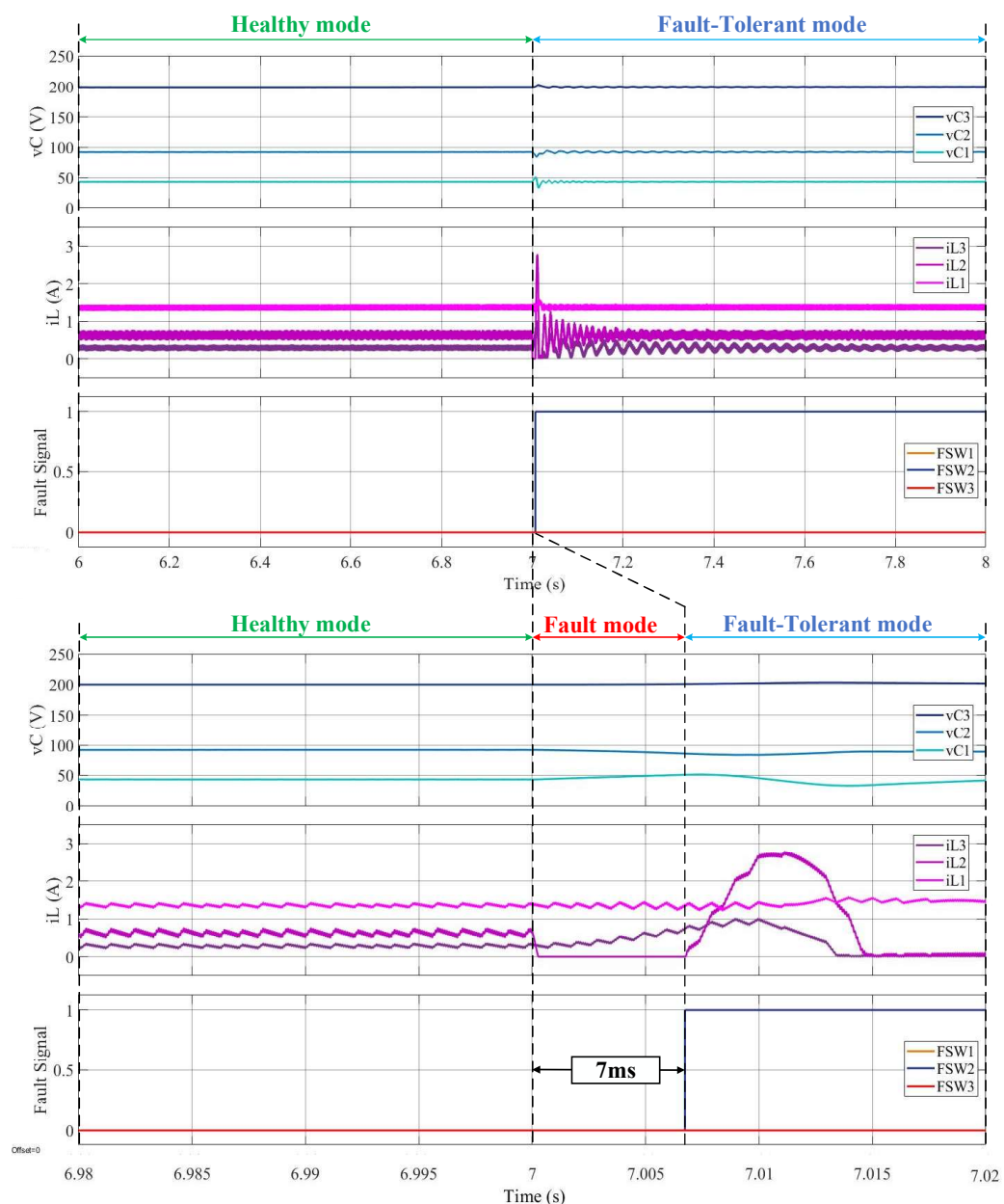
รูปที่ 7.18 แรงดันเอาต์พุต กระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่หนึ่ง และสัญญาณการสวิตช์เมื่อเกิดความผิดปกติพร้อมแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_2



รูปที่ 7.19 สัญญาณการสวิตช์ และสัญญาณการตรวจจับความผิดปกติพร้อมเมื่อเกิดความผิดปกติพร้อมแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_2

จากผลการทดสอบวงจรรูปแบบแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นเมื่อเกิดความผิดปกติพร้อมแบบการเปิดวงจรที่ S_2 ตามที่ได้แสดงไว้ข้างต้น เมื่อเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์

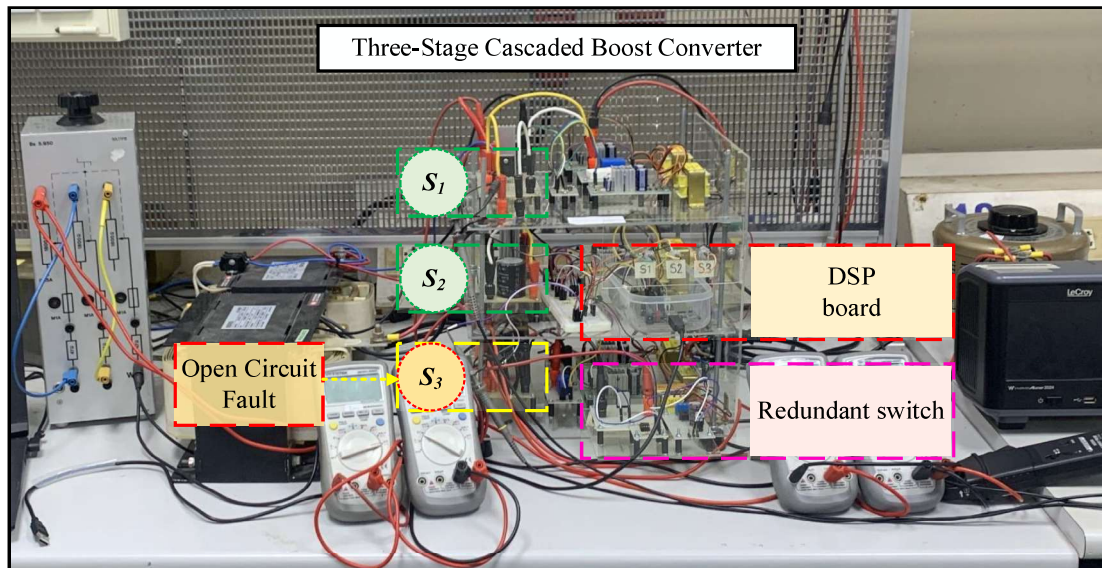
ที่แสดงในรูปที่ 7.20 จะพบว่าผลการจำลองสถานการณ์สามารถตรวจจับความผิดปกติได้เร็วกว่าผลการทดสอบจริง โดยใช้เวลาประมาณ 7ms ความคลาดเคลื่อนอาจเกิดขึ้นได้จากอุปกรณ์ต่าง ๆ ในชุดทดสอบ อย่างไรก็ตามผลการจำลองสถานการณ์ยังคงมีความคล้ายคลึงกับผลการทดสอบจริงในชุดทดสอบ แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการสร้างความคงทนต่อความผิดปกติ ซึ่งสามารถตรวจจับความผิดปกติที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและถูกต้อง ทำให้วงจรทำงานอย่างต่อเนื่องได้อย่างมีประสิทธิภาพ



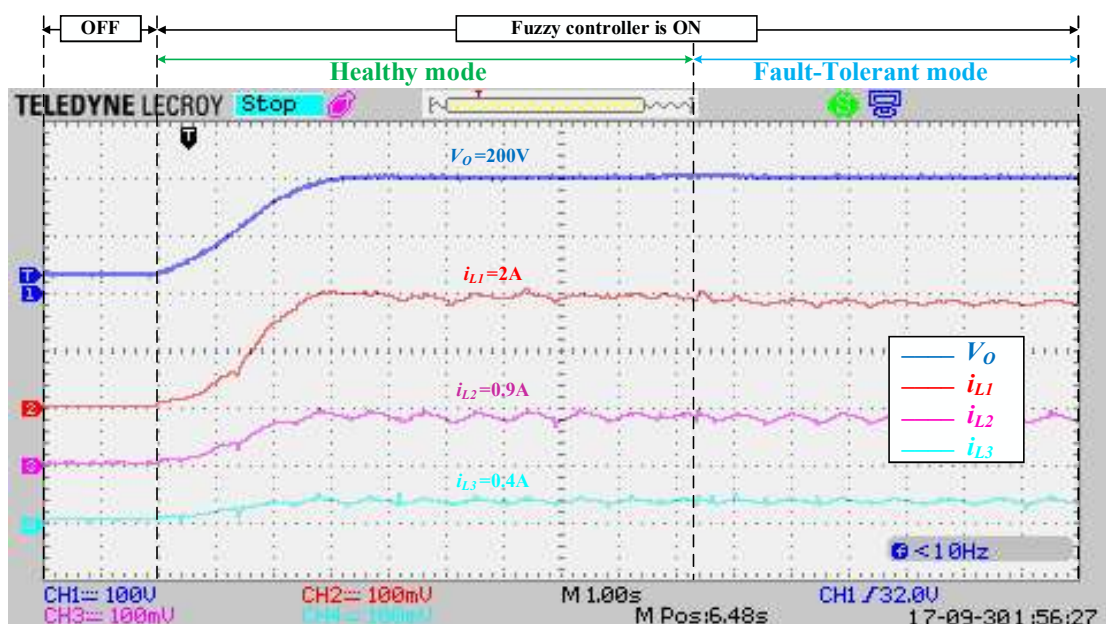
รูปที่ 7.20 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อเกิดความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_2 ภายใต้สภาวะคงทนต่อความผิดปกติ

7.3.3 กรณีเกิดความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_3

การทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์เรียงต่อกันสามชั้นเมื่อเกิดความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_3 ดำเนินการโดยใช้ชุดทดสอบตามรูปที่ 7.21 โดยกำหนดแรงดันอ้างอิงที่ 200V ผ่านการตั้งค่าในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น eZdspTMF28335 และใช้แรงดันอินพุตคงที่ 20V พร้อมโหลดตัวต้านทาน 1600Ω

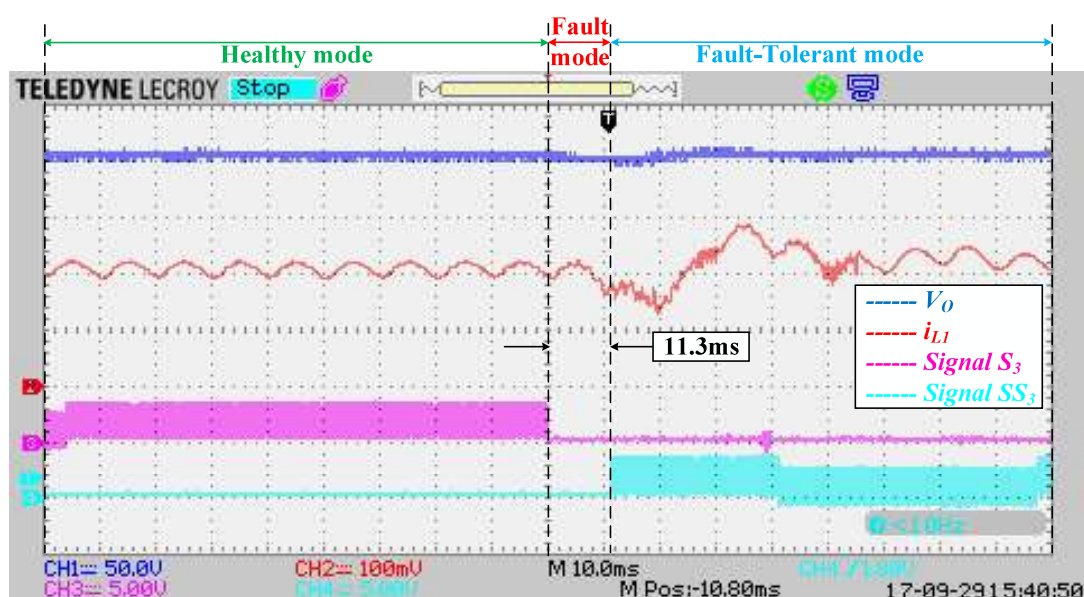


รูปที่ 7.21 ชุดทดสอบวงจรเมื่อเกิดความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_3



รูปที่ 7.22 ผลการทดสอบวงจรเมื่อเกิดความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_3

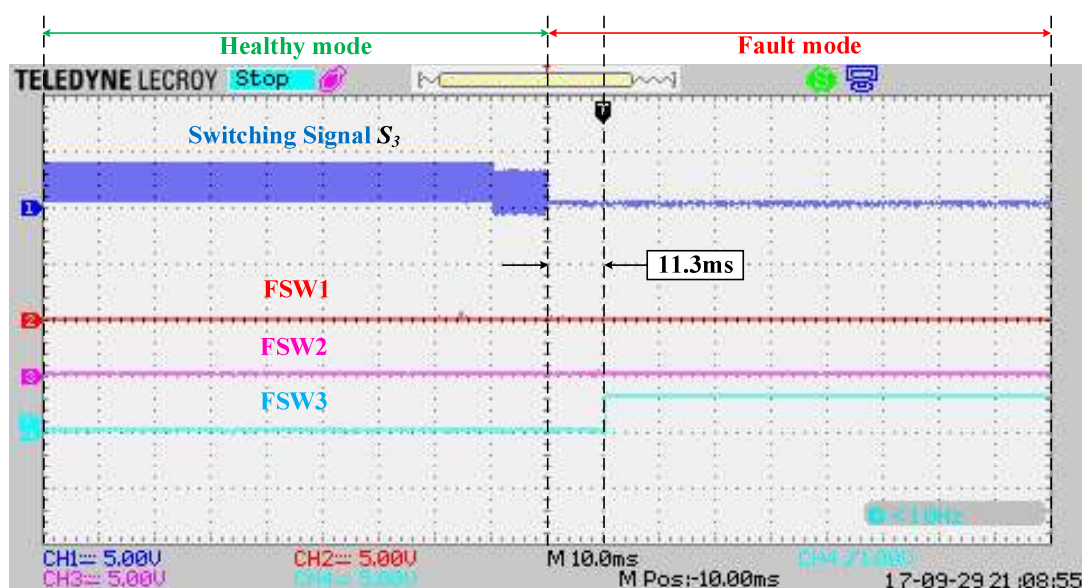
ผลการทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นเมื่อเกิดความผิดปกติของสวิตช์เปิดวงจรที่ S_3 แสดงในรูปที่ 7.22 ในโหมดสถานะปกติ (Healthy Mode) พบว่าตัวควบคุมสามารถเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุต และกระแสไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำได้ตามความต้องการ หลังจากเกิดความผิดปกติของสวิตช์เปิดวงจรที่ S_3 จะสังเกตได้ว่าค่าแรงดันเอาต์พุต และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวของชุดทดสอบวงจรมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย โดยสามารถตรวจจับความผิดปกติของสวิตช์เปิดวงจรที่ S_3 ได้ และส่งสัญญาณการสวิตช์ให้กับสวิตช์สำรอง SS_3 ทำงานแทนทันทีเมื่อตรวจจับได้ เมื่อพิจารณาผลการทดสอบวงจรในรูปที่ 7.23 แสดงค่าแรงดันเอาต์พุต และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวในโหมดการทำงานปกติ (Healthy Mode) หลังจากเกิดความผิดปกติทำให้แรงดันเอาต์พุตลดลงจากการคายประจุของตัวเก็บประจุ C_3 ไปยังโหลดตัวต้านทาน ทำให้สามารถตรวจจับความผิดปกติของการเปิดวงจรที่ S_3 และส่งสัญญาณการสวิตช์ให้กับสวิตช์สำรอง SS_3 ให้ทำงานแทนทันทีเมื่อตรวจจับได้



รูปที่ 7.23 แรงดันเอาต์พุต กระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่หนึ่ง และสัญญาณการสวิตช์เมื่อเกิดความผิดปกติของสวิตช์เปิดวงจรที่ S_3

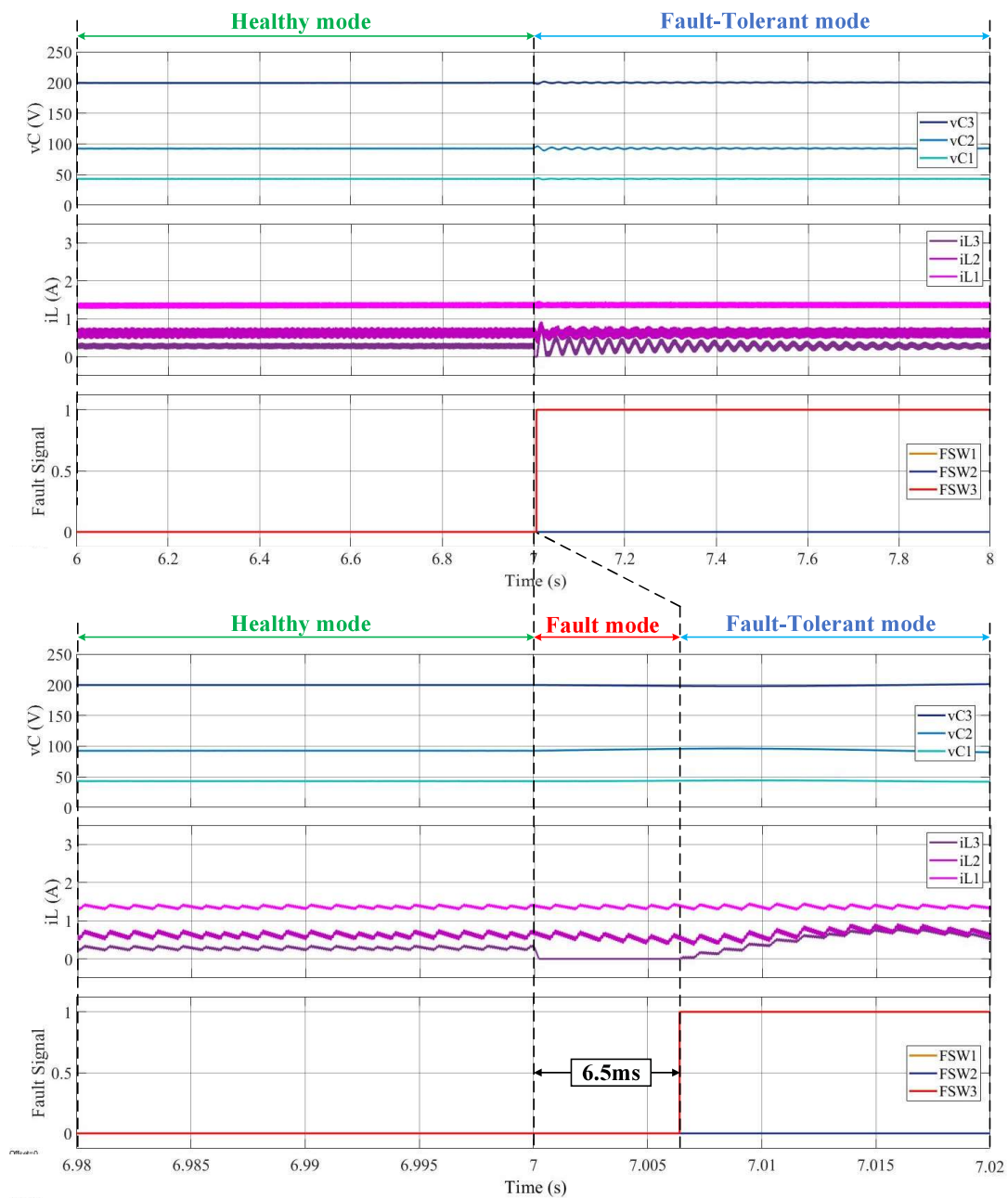
ผลการทดสอบวงจรตามรูปที่ 7.24 ที่แสดงสัญญาณการสวิตช์ S_3 และสัญญาณการตรวจจับความผิดปกติของสวิตช์ทั้งสามตัว FSW_1 , FSW_2 และ FSW_3 พบว่าในโหมดการทำงานปกติก่อนเกิดความผิดปกติ สัญญาณการสวิตช์ S_3 ยังคงสร้างสัญญาณพัลส์ ส่วนสัญญาณการตรวจจับความผิดปกติของสวิตช์ทั้งสามตัวมีค่าเป็นศูนย์ แต่หลังจากเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_3 พบว่าสัญญาณการ

สวิตช์ S_3 จะมีค่าเป็นศูนย์ ส่วนสัญญาณการตรวจจับความผิดปกติ FSW_1 , FSW_2 และ FSW_3 จะมีค่าเป็น 0, 0 และ 1 ตามลำดับ และส่งสัญญาณการสวิตช์ให้กับสวิตช์สำรอง SS_3 เพื่อให้ทำงานแทนทันที การตรวจจับความผิดปกติแบบการเปิดวงจรที่ S_3 ใช้ระยะเวลาประมาณ 11.3ms ซึ่งทำให้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นทำงานได้ต่อเนื่องอย่างมีประสิทธิภาพในโหมดความคงทนต่อความผิดปกติ



รูปที่ 7.24 สัญญาณการสวิตช์ และสัญญาณการตรวจจับความผิดปกติเมื่อเกิดความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_3

จากผลการทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นเมื่อเกิดความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_3 ที่ได้แสดงไว้ข้างต้น เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์แสดงในรูปที่ 7.25 พบว่าระบบจำลองสถานการณ์สามารถตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_3 ได้เร็วกว่า โดยที่ชุดทดสอบสามารถตรวจจับความผิดปกติได้โดยใช้เวลาประมาณ 11.3ms ส่วนผลการจำลองสถานการณ์ในการตรวจจับความผิดปกติที่ S_3 โดยใช้เวลาประมาณ 6.5ms จากผลการทดสอบวงจรและผลการจำลองสถานการณ์มีความสอดคล้องกัน ซึ่งสามารถตรวจจับความผิดปกติที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและถูกต้อง ทำให้วงจรทำงานอย่างต่อเนื่องได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 7.25 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อเกิดความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_3

7.4 สรุป

บทนี้นำเสนอผลการทดสอบของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น โดยทำการทดสอบวงจรภายใต้การเปลี่ยนแปลงจุดการทำงานของแรงดันอ้างอิง แรงดันอินพุต และโหลด ตัวต้านทาน อีกทั้งยังแสดงผลการเปรียบเทียบผลการทดสอบชุดทดสอบกับผลการจำลองสถานการณ์ พบว่ามีความสอดคล้องใกล้เคียงกันทั้งในสภาวะชั่วคราวและสภาวะอยู่ตัว ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพ

ของตัวควบคุมฟิชซีที่พัฒนาขึ้นในการรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นภายใต้สถานการณ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงจุดการทำงาน นอกจากนี้ได้นำเสนอผลการทดสอบของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นเมื่อเกิดความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรทั้งสามตัว ซึ่งจากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าวิธีตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรที่พัฒนาขึ้น สามารถตรวจจับ และระบุตำแหน่งความผิดปกติ รวมถึงการสร้าง ความคงทนต่อความผิดปกติให้กับวงจร จากเปรียบเทียบผลการทดสอบชุดทดสอบกับผลการจำลองสถานการณ์พบว่ามีผลสอดคล้องกัน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิผลของการสร้างความคงทนต่อความผิดปกติที่สามารถตรวจจับความผิดปกติที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและถูกต้อง ทำให้วงจรทำงานอย่างต่อเนื่องได้อย่างมีประสิทธิภาพ