

บทที่ 5

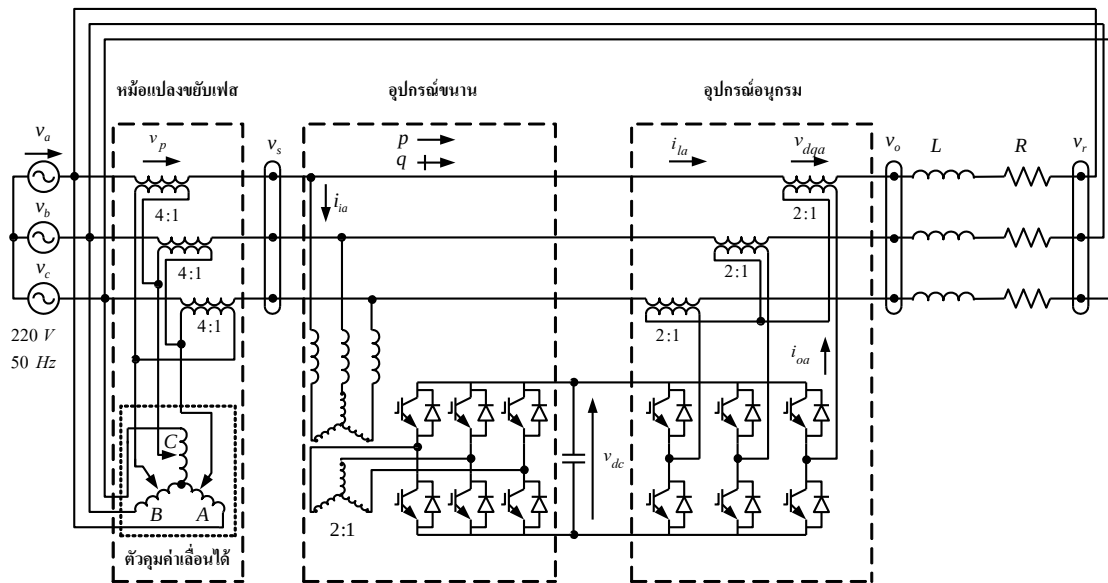
การออกแบบวงจร UPFC

บทนี้เป็นการอธิบายองค์ประกอบของ UPFC ที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการ เพื่อทดสอบเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมระหว่างตัวควบคุมพีไอ และตัวควบคุมพีชซีลอจิก ระบบทดสอบที่สร้างนี้มีทั้งส่วนของฮาร์ดแวร์ (hardware) และซอฟต์แวร์ (software) ในส่วนของฮาร์ดแวร์ประกอบด้วยวงจรกำลังของ UPFC วงจรวัดสัญญาณ วงจรประวิงเวลา (blanking time) วงจรป้องกันกระแสเกิน (over-current protection circuit) และวงจรขับขาเกตของ IGBT (IGBT gate drive) ในส่วนของซอฟต์แวร์ถูกเขียนโดยภาษา C++ เพื่อควบคุมการทำงานของ UPFC สำหรับวิธีการสวิตช์ IGBT เลือกใช้การมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบสเปซเวกเตอร์ (space-vector pulse width modulation : SVPWM)

5.1 วงจรกำลัง

ระบบที่ใช้ทดสอบแสดงดังรูปที่ 5.1 จากรูปจะเห็นได้ว่าการใช้หม้อแปลงหลายตัวเหตุผลก็เนื่องจากการต้องมีการจำลองระบบไฟฟ้ากำลังขึ้นในห้องปฏิบัติการก่อน กล่าวคือ ต้องสร้างระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสให้ด้านส่งและด้านรับมีมุมเฟสต่างกัน แล้วจึงนำ UPFC ติดตั้งในระบบดังกล่าว เพื่อทำหน้าที่ควบคุมกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่ง วิทยานิพนธ์นี้ระบบที่สร้างขึ้นทดสอบถูกออกแบบให้สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าในสายส่งได้ไม่เกิน 1 กิโลวัตต์แอมแปร์

สำหรับสวิตช์ที่ใช้มี 12 สวิตช์และต้องเป็นแบบสองทิศทาง ดังนั้นจึงเลือกใช้ IGBT ที่มีไดโอดต่อขนาน โดยสวิตช์ต้องสามารถทนต่อแรงดันของแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรงเชื่อมต่อโยง และกระแสที่จะไหลผ่านสวิตช์ได้ ขนาดความจุของตัวเก็บประจุจะส่งผลต่อริปเปิล (ripple) ของแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรงเชื่อมต่อโยง ค่าความจุของตัวเก็บประจุมีค่ามากจะช่วยลดริปเปิลของแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรงเชื่อมต่อโยง และทำให้ตัวเก็บประจุสามารถเก็บพลังงานไว้ได้มาก การเลือกพิกัดแรงดันของตัวเก็บประจุได้มาจากการออกแบบขนาดแรงดันของแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรงเชื่อมต่อโยง ระบบ UPFC ที่ใช้ทดสอบได้ออกแบบให้แหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรงเชื่อมต่อโยงมีขนาด 270 โวลต์ และได้เลือกตัวเก็บประจุมีพิกัดแรงดัน 450 โวลต์ ซึ่งมีขายตามท้องตลาด



รูปที่ 5.1 วงจรกำลัง UPFC ที่ใช้ทดสอบ

องค์ประกอบของระบบในรูปที่ 5.1 มีดังนี้

- หม้อแปลงเฟสเดียวขนาด 150 VA 100V/25V จำนวน 3 ตัว (หม้อแปลงขั้วเฟส)

ตัวที่ 1 : $X_{eq} = 2.58$ โอห์ม และ $R_{eq} = 4.67$ โอห์ม (ทดสอบแบบลัดวงจร)

ตัวที่ 2 : $X_{eq} = 2.78$ โอห์ม และ $R_{eq} = 4.67$ โอห์ม

ตัวที่ 3 : $X_{eq} = 2.95$ โอห์ม และ $R_{eq} = 4.44$ โอห์ม

- หม้อแปลงเฟสเดียวขนาด 250 VA 100V/50V จำนวน 3 ตัว (หม้อแปลงอนุกรม)

ตัวที่ 1 : $X_{eq} = 2.23$ โอห์ม และ $R_{eq} = 2.24$ โอห์ม (ทดสอบแบบลัดวงจร)

ตัวที่ 2 : $X_{eq} = 2.29$ โอห์ม และ $R_{eq} = 2.24$ โอห์ม

ตัวที่ 3 : $X_{eq} = 2.33$ โอห์ม และ $R_{eq} = 2.08$ โอห์ม

- หม้อแปลงสามเฟสขนาด 1 kVA 220V/110V จำนวน 1 ตัว (หม้อแปลงขนาน)

เฟส A : $X_{eq} = 20.46$ โอห์ม และ $R_{eq} = 5.23$ โอห์ม (ทดสอบแบบลัดวงจร)

เฟส B : $X_{eq} = 19.99$ โอห์ม และ $R_{eq} = 4.36$ โอห์ม

เฟส C : $X_{eq} = 17.61$ โอห์ม และ $R_{eq} = 4.36$ โอห์ม

- หม้อแปลงอัตโนมัติ (auto-transformer) แบบสามเฟส จำนวน 2 ตัว
- ตัวเหนี่ยวนำ $L = 12$ มิลลิเฮนรี และ 16 มิลลิเฮนรี
- ตัวต้านทาน $R = 0.4$ โอห์ม และ 0.6 โอห์ม
- ตัวเก็บประจุขนาด 3,100 ไมโครฟารัด พิกัดแรงดัน 450 โวลต์ จำนวน 1 ตัว
- IGBT เบอร์ HGTG20N60B3D จำนวน 12 ตัว

5.2 วงจรควบคุม

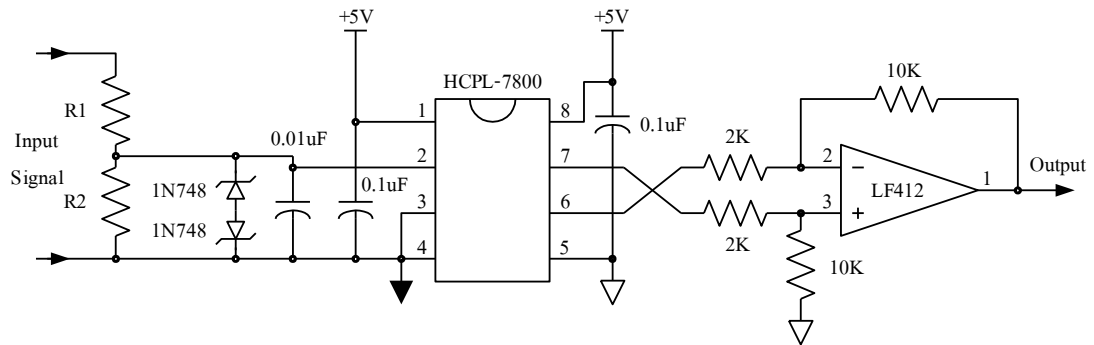
บล็อกไดอะแกรมของการควบคุมแสดงดังรูปที่ 5.2 และรายละเอียดของแต่ละวงจรมีดังนี้

5.2.1 วงจรวัดสัญญาณ

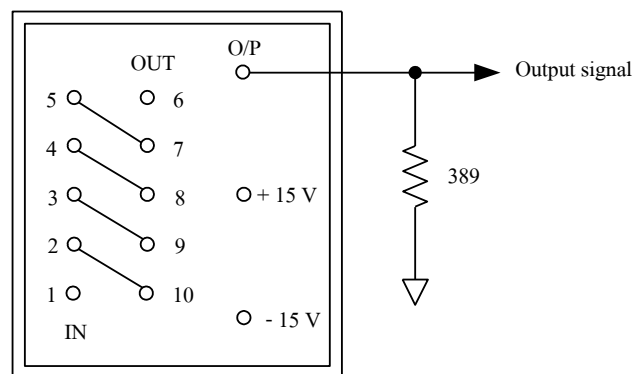
แรงดันแต่ละเฟส กระแสแต่ละเฟส และแรงดันของแหล่งจ่ายแรงดัน กระแสตรงเชื่อมโยง จะถูกส่งเข้าเครื่องคอมพิวเตอร์ เพื่อนำไปคำนวณหาสถานะของระบบ UPFC และการควบคุม รูปที่ 5.3 แสดงวงจรวัดสัญญาณของแรงดันแต่ละเฟสและแรงดันของแหล่งจ่าย แรงดันกระแสตรงเชื่อมโยง แรงดันเฟสขนาด 220 โวลต์ (ค่า rms) จะถูกแบ่งแรงดันโดยใช้ตัวต้านทานให้ขนาดแรงดันเหลือ 200 มิลลิโวลต์ (ค่า rms) และแรงดันของแหล่งจ่ายแรงดัน กระแสตรงเชื่อมโยงขนาด 270 โวลต์ (ค่าคิซี) ก็จะถูกแบ่งแรงดันลดขนาดลงเหลือ 200 มิลลิโวลต์ (ค่า rms) สำหรับ HCPL-7800 เป็นไอซีที่ทำหน้าที่เป็นวงจรขยายแยกโคด (isolation amplifier) ที่มีอัตราขยาย 8 เท่า ในการตรวจจับกระแสจะใช้ตัวตรวจจับกระแสเบอร์ CLN-25 ของบริษัท F.W.Bell ซึ่งมีการขยายแยกโคดระหว่างส่วนของอินพุตและเอาต์พุต และโดยการต่อวงจรของ CLN-25 ตามรูปที่ 5.4 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตต่อกระแสที่ไหลประมาณ 2.75 โวลต์ต่อแอมแปร์ (ค่าขอด) และสามารถตรวจวัดกระแสได้ไม่เกิน 7 แอมแปร์ (ค่าขอด)



รูปที่ 5.2 บล็อกไดอะแกรมของการควบคุม



รูปที่ 5.3 วงจรวัดสัญญาณของแรงดันแต่ละเฟสและแรงดันของแหล่งจ่าย
แรงดันกระแสตรงเชื่อมโยง



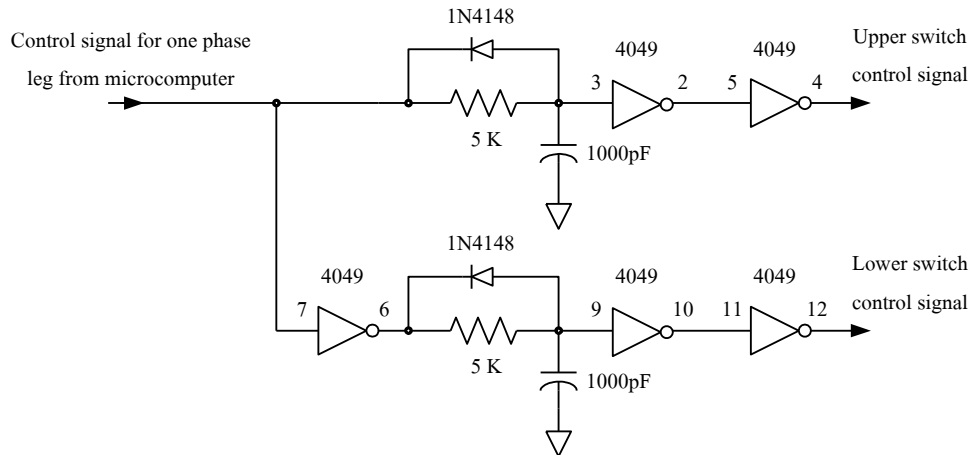
รูปที่ 5.4 วงจรตรวจจับกระแสแต่ละเฟส

5.2.2 วงจรประวิงเวลา

แต่ละขาจะมีสวิตช์ 2 สวิตช์ และในทางอุดมคติสถานะการสวิตช์จะตรงข้ามกัน อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติขณะสวิตช์ทั้งสองมีการเปลี่ยนสถานะ จะเกิดการปิดวงจรพร้อมกันในช่วงเวลาสั้น ๆ ซึ่งจะทำให้เกิดการลัดวงจรของแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรงเชื่อมโยง เพื่อหลีกเลี่ยงเหตุการณ์ดังกล่าวจึงจำเป็นต้องมีวงจรประวิงเวลา โดยเวลาการหน่วงอยู่ในช่วงไมโครวินาที วงจรประวิงเวลาในระบบที่ทดสอบแสดงดังรูปที่ 5.5 และมีค่าเวลาการหน่วงประมาณ 3 ไมโครวินาที

5.2.3 วงจรป้องกันกระแสเกิน

วงจรป้องกันกระแสเกินจะรับสัญญาณที่บ่งชี้ว่า เกิดกระแสเกินจากวงจรขับเคลื่อนของ IGBT ไอซีเบอร์ H11L1 เป็นตัวเชื่อมต่อให้แสงที่ให้การแยกโคจรระหว่างวงจรขับเคลื่อน



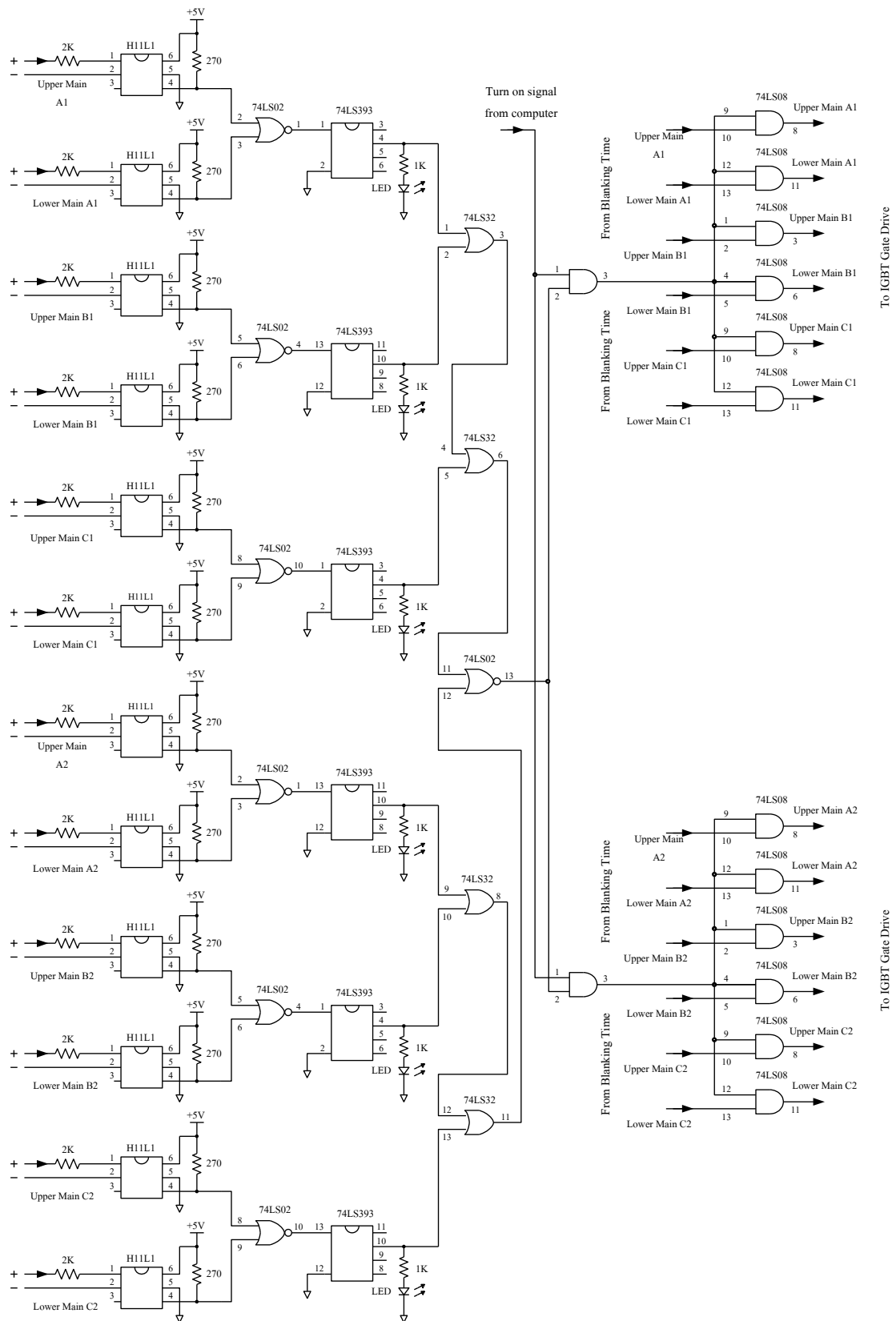
รูปที่ 5.5 วงจร/ประวิงเวลา

และวงจรควบคุม วงจรป้องกันกระแสเกินจะนับสัญญาณกระแสเกินของแต่ละขาเฟส เมื่อตรวจพบกระแสเกินจำนวน 4 ครั้งในขาเฟส วงจรป้องกันกระแสเกินจะส่งสัญญาณไปควบคุมให้สวิตช์ทุกตัวเปิดวงจร นอกจากนี้ยังสามารถควบคุมให้สวิตช์ทุกตัวเปิดวงจรได้ โดยการส่งสัญญาณรีเซ็ตมาจากเครื่องคอมพิวเตอร์อีกด้วย รายละเอียดของวงจรป้องกันกระแสเกินแสดงดังรูปที่ 5.6

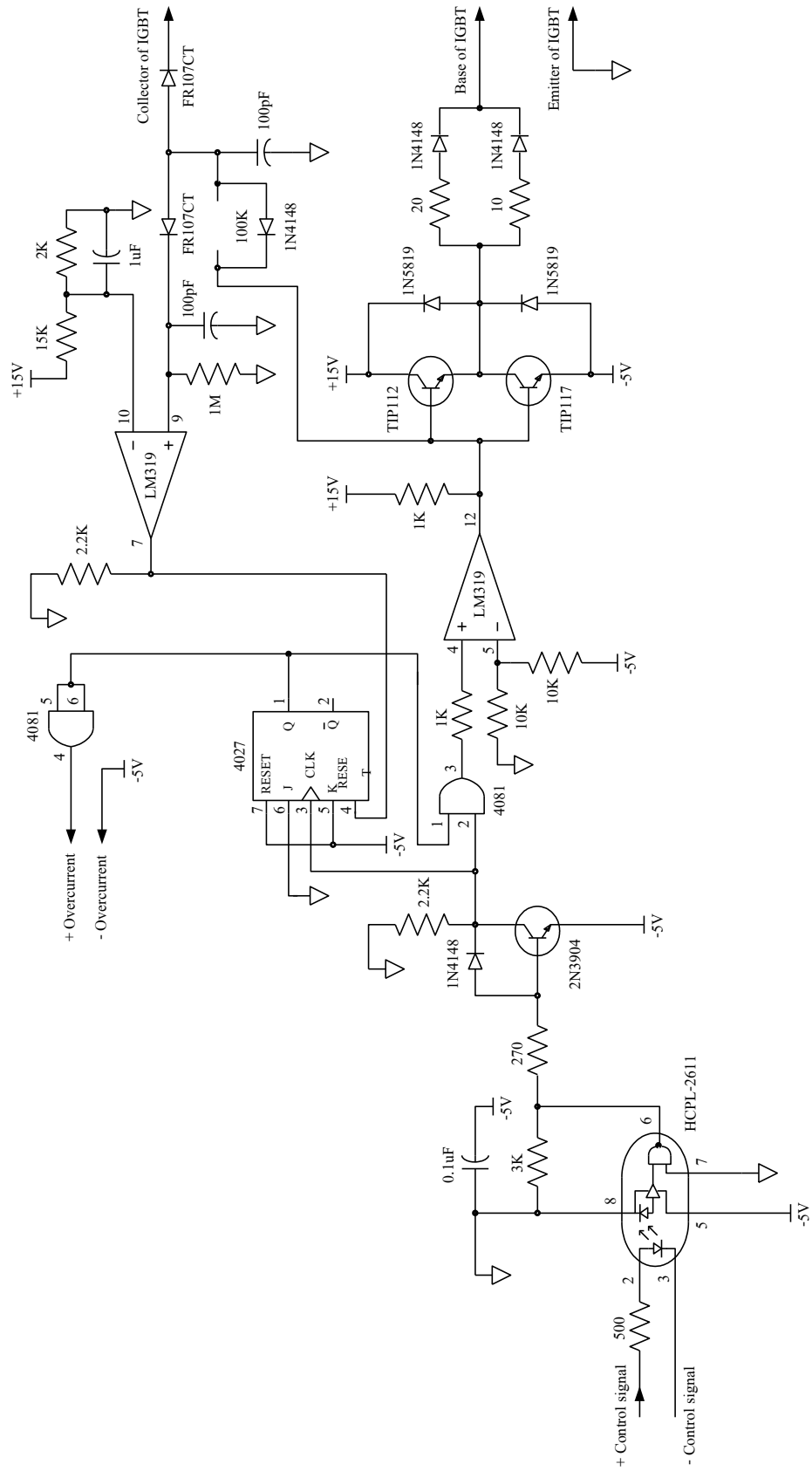
5.2.4 วงจรขับเคลื่อนขาเกตของ IGBT

วงจรขับเคลื่อนขาเกตที่ใช้ในการทดสอบแสดงดังรูปที่ 5.7 ไอซีเบอร์ HCPL-2611 เป็นตัวเชื่อมต่อใช้แสงที่ทำให้การแยกโคด ทรานซิสเตอร์เบอร์ 2N3904 ทำหน้าที่เป็นสวิตช์และช่วยยกระดับของกระแส ไอซีเบอร์ LM319 ทำหน้าที่เป็นตัวเปรียบเทียบ (comparator) โดยหากตัวเปรียบเทียบนำกระแสจะส่งผลให้ *nnp* BJT นำกระแส ทำให้แรงดันขาเกตของ IGBT เป็นบวก และหากตัวเปรียบเทียบไม่นำกระแสจะส่งผลให้ *pnp* BJT นำกระแส ทำให้แรงดันขาเกตของ IGBT เป็นลบ

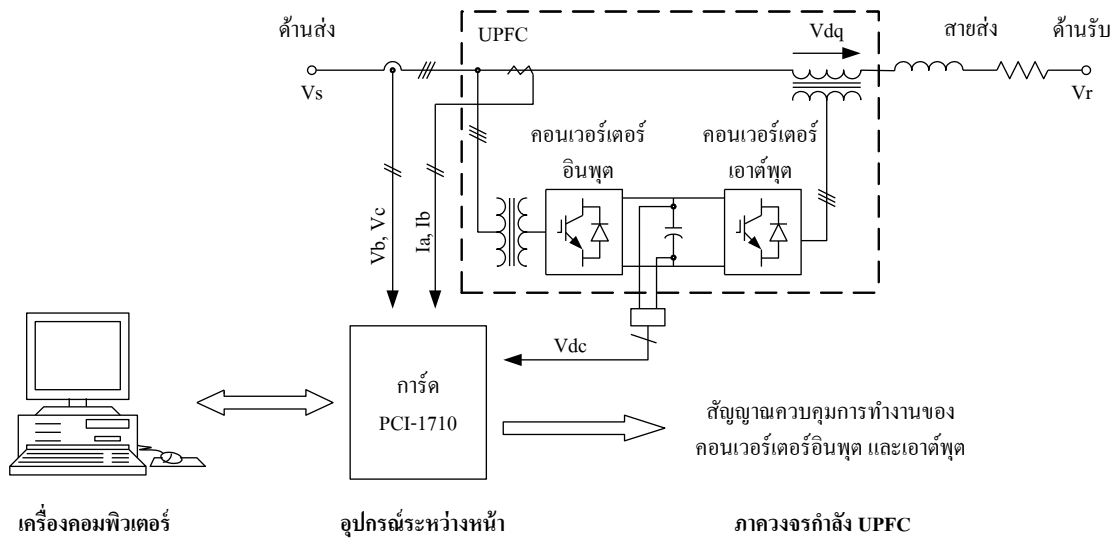
ในกรณีที่กระแสไหลผ่าน IGBT จนเกินขนาดพิกัดของ IGBT หากไม่มีการป้องกันกระแสเกินจะทำให้เกิดความเสียหายขึ้นกับ IGBT เนื่องจากการติดตั้งฟิวส์เพื่อป้องกันกระแสเกินก็ยังให้ความรวดเร็วในการป้องกันได้ไม่เพียงพอ ดังนั้นในวงจรขับเคลื่อนขาเกตที่ใช้ทดสอบจึงได้เพิ่มส่วนตรวจจับกระแสเกิน โดยใช้ LM 319 เป็นตัวเปรียบเทียบแรงดันที่กำหนดไว้กับแรงดันระหว่างคอลเลกเตอร์และอิมิตเตอร์ของ IGBT สัญญาณกระแสเกินที่ได้จะถูกส่งไปยังวงจรป้องกันกระแสเกินต่อไป



รูปที่ 5.6 วงจรป้องกันกระแสเกิน



รูปที่ 5.7 วงจรขับขาเกตของ IGBT



รูปที่ 5.8 การควบคุมวงจรถัก UPFC

5.3 ซอฟต์แวร์สำหรับควบคุม

วิทยานิพนธ์นี้มีการควบคุมวงจรถัก UPFC แสดงดังรูปที่ 5.8 วงจรตรวจวัดสัญญาณจะส่งสัญญาณแรงดันและกระแสไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์ แล้วเครื่องคอมพิวเตอร์จะประมวลผล และส่งสัญญาณควบคุมกลับไปควบคุมการทำงานของระบบ การเชื่อมโยงการทำงานระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์กับอุปกรณ์ภายนอกจำเป็นต้องมีตัวแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิทัล (analog to digital converter : A/D) วิทยานิพนธ์นี้ใช้การ์ด PCI-1710 ของบริษัท ADVANTEC ทำหน้าที่ดังกล่าว โดยตัวแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิทัลในการ์ด PCI-1710 จะมีขนาด 12 บิต มีการรับข้อมูลที่ช่องสัญญาณ และมีเวลาการแปลงผัน (conversion time) 8 ไมโครวินาทีต่อช่องสัญญาณ และเนื่องจากการประยุกต์ใช้งานการ์ด PCI-1710 ในวิทยานิพนธ์นี้ จะใช้งานตัวแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิทัลเฉพาะช่องสัญญาณที่เท่านั้น เพราะช่องสัญญาณคู่มือไว้สำหรับโหมดดิฟเฟอเรนเชียล (differential mode) โดยมีการใช้งานช่องสัญญาณ 1 3 5 7 และ 9 ดังนั้นเวลาหน่วง (delay time) ระหว่างช่องสัญญาณที่ 1 กับ 3 จึงเป็น 2 เท่าของเวลาการแปลงผัน หรือ 16 ไมโครวินาที และเวลาหน่วงระหว่างช่องสัญญาณที่ 1 กับ 5 จึงเป็น 4 เท่าของเวลาการแปลงผัน เป็นต้น

รายละเอียดของโปรแกรมควบคุมการทำงานดูได้จากซีดีรอมที่แนบมากับหนังสือวิทยานิพนธ์ สำหรับขั้นตอนการทำงานที่สำคัญของโปรแกรมควบคุมสามารถแยกได้ดังนี้

5.3.1 โปรแกรมหลัก

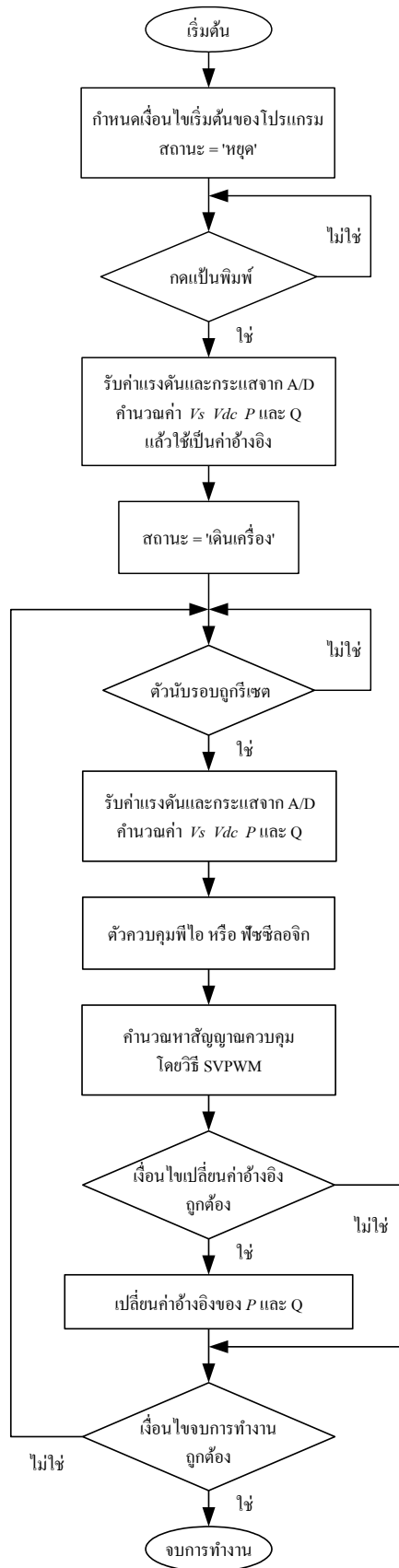
ทำหน้าที่ควบคุมกระบวนการทำงานที่สำคัญ ในเบื้องต้นโปรแกรมนี้อาจกำหนดสถานะเริ่มต้นต่าง ๆ ที่จำเป็น แล้วรอนจนกระทั่งมีการกดแป้นพิมพ์ จึงรับสัญญาณแรงดันและกระแสมาคำนวณหาค่าตัวแปรที่ต้องการ ค่าตัวแปรที่ได้จะถูกส่งไปยังส่วนของตัวควบคุมพีไอหรือพีซีลอจิก เพื่อหาค่าแรงดันควบคุมในแกน dq ต่อมาผลลัพธ์ที่ได้จะถูกนำไปคำนวณเวลา และรูปแบบการสวิตช์ของ IGBT พังการไหลของโปรแกรมหลักแสดงดังรูปที่ 5.9

5.3.2 โปรแกรมขัดจังหวะ

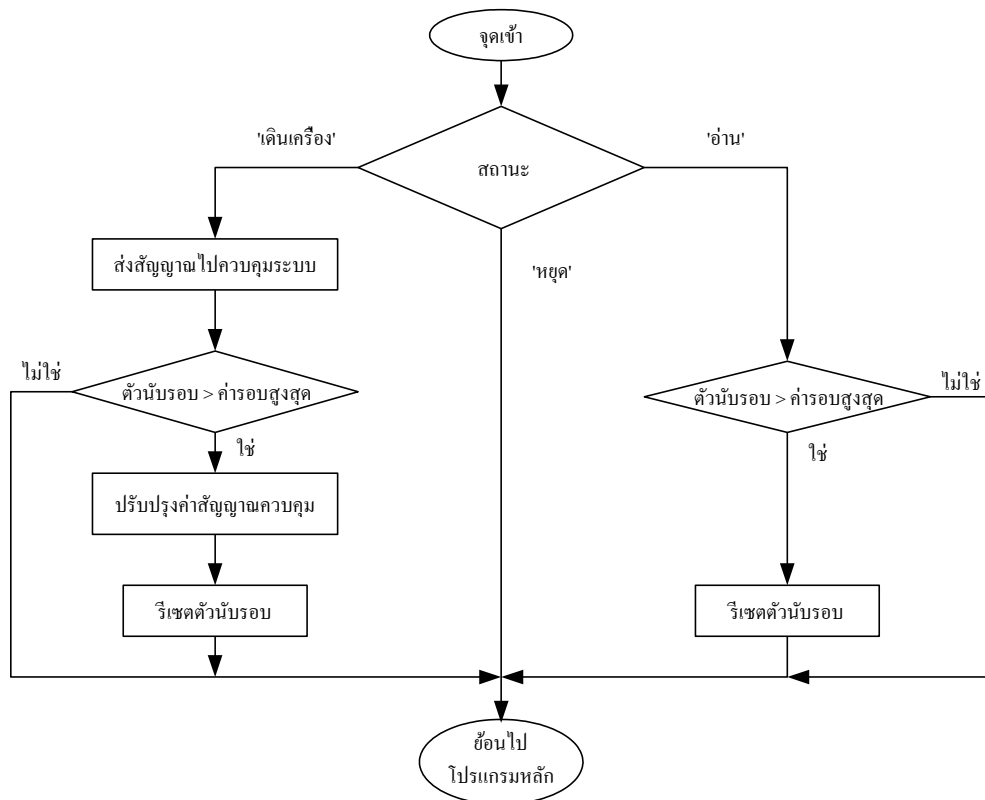
เป็นโปรแกรมย่อยที่ทำงานควบคู่กับโปรแกรมหลัก โปรแกรมนี้จะทำหน้าที่นับเวลา และส่งสัญญาณออกไปควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ โดยเทียบเวลากับสัญญาณเวลาของหน่วยประมวลผลในเครื่องคอมพิวเตอร์ โปรแกรมขัดจังหวะจะทำงานทุก ๆ 40 ไมโครวินาที และเมื่อโปรแกรมทำงานไปครบตามจำนวนรอบที่กำหนดไว้ ก็จะมีการรีเซ็ตตัวนับรอบใหม่ สังเกตว่าคาบเวลาของการรีเซ็ตตัวนับรอบก็คือคาบเวลาในการสวิตช์ของ IGBT และพังการไหลของโปรแกรมขัดจังหวะแสดงดังรูปที่ 5.10

การใช้เครื่องคอมพิวเตอร์คำนวณเวลา และลำดับการสวิตช์โดยวิธี SVPWM (space-vector pulse-width modulation) แล้วส่งสัญญาณไปควบคุม IGBT นั้น ความถี่ในการสวิตช์จะถูกจำกัดโดยคาบเวลาของการขัดจังหวะการทำงาน เปอร์เซนต์ของอัตราส่วนหน้าที่ (duty ratio) และสมรรถนะของเครื่องคอมพิวเตอร์ วิทยานิพนธ์นี้ใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ Pentium II ความเร็ว 233 เมกะเฮิร์ตซ์ และได้ความถี่สูงสุดในการสวิตช์เป็น 1 กิโลเฮิร์ตซ์ ที่เปอร์เซนต์ของอัตราส่วนหน้าที่น้อยสุด 4 เปอร์เซนต์

รูปที่ 5.11 และรูปที่ 5.13 แสดงวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ใช้ทดสอบในห้องปฏิบัติการ จากรูปเห็นได้ว่าการสร้างโครงหลักแยกเป็น 3 ชั้น โดยหม้อแปลงและตัวเก็บประจุ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่มีน้ำหนักมาก มีการติดตั้งไว้ที่ชั้นล่างของโครงหลัก ชั้นที่สองเป็นส่วนของวงจรวัดสัญญาณ วงจรป้องกัน และวงจรควบคุม สำหรับชั้นที่สามจะเป็นวงจรคอนเวอร์เตอร์ และฟิวส์ (fuse) การจัดวางอุปกรณ์ในลักษณะดังกล่าวนี้จะช่วยให้การตรวจซ่อม และเปลี่ยนอุปกรณ์ที่เสียหายเป็นไปได้ง่าย



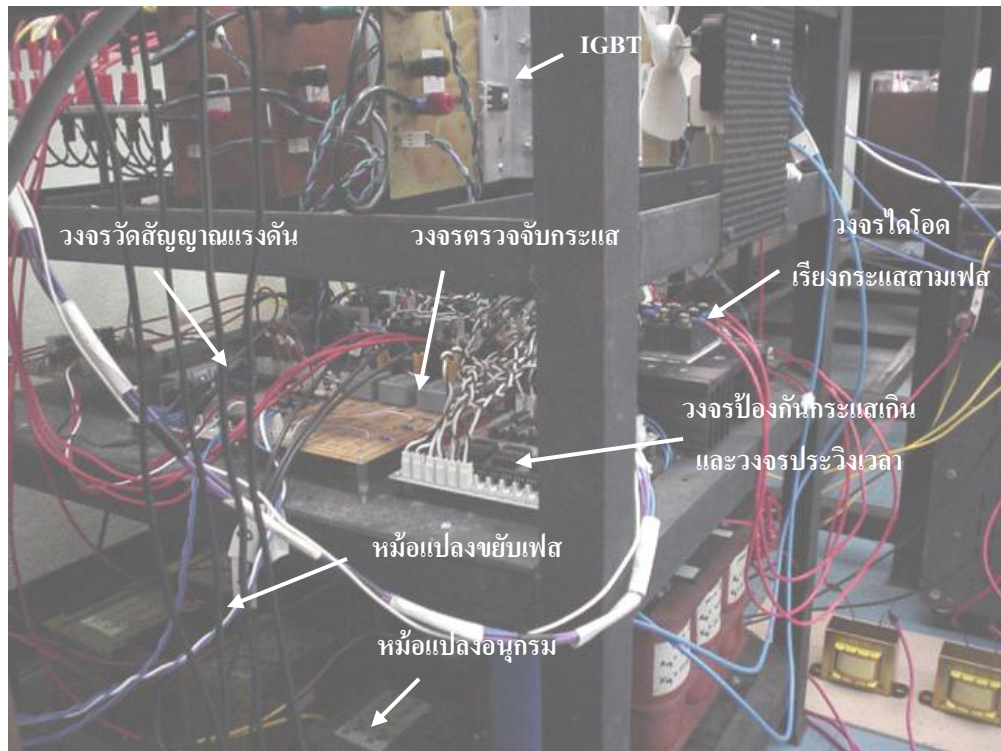
รูปที่ 5.9 ฟังก์ชันการไหลของโปรแกรมหลัก



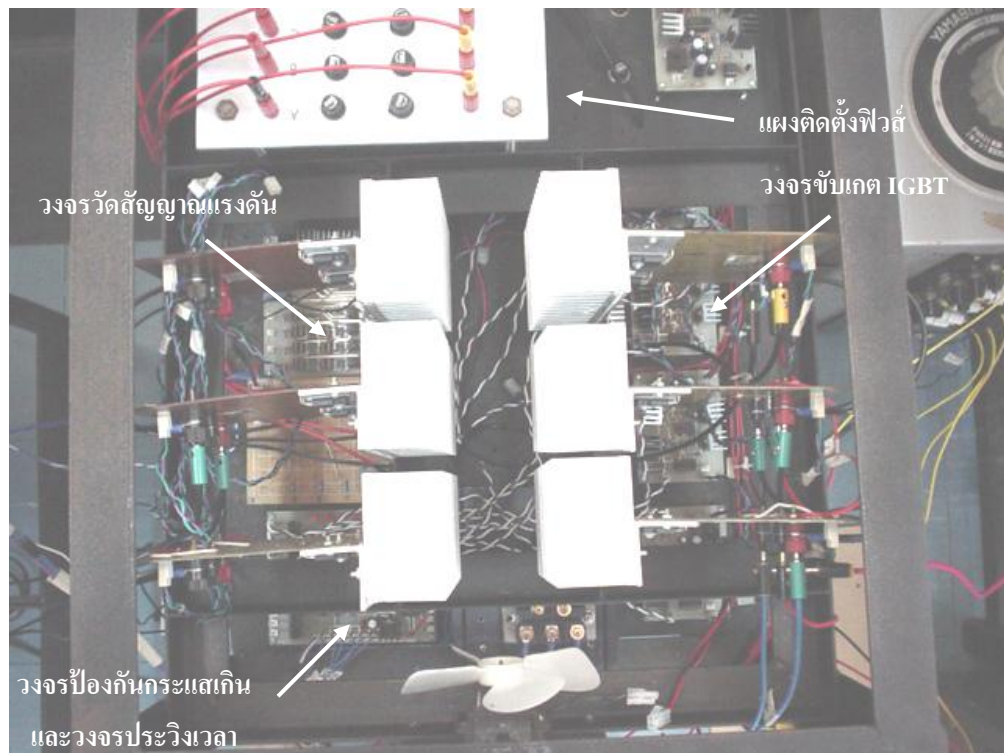
รูปที่ 5.10 ผังการไหลของโปรแกรมขัดจังหวะ



รูปที่ 5.11 วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ใช้ทดสอบ



รูปที่ 5.12 วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ใช้ทดสอบ (ต่อ)



รูปที่ 5.13 วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ใช้ทดสอบ (ต่อ)