



### บทที่ 3

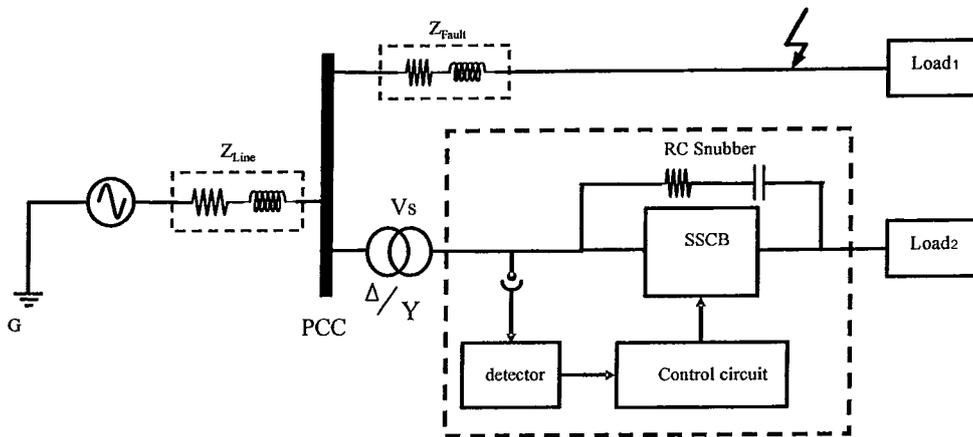
#### การออกแบบเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบโซลิตสเตท

ในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK สร้างแบบจำลองเหตุการณ์เมื่อเกิดความผิดพลาดในระบบไฟฟ้ากำลัง วัดค่ากระแสและแรงดันที่เกิดขึ้นในระบบจำลองปริมาณไฟฟ้าเป็นสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา เพื่อออกแบบจำลองพฤติกรรมของSSCB โดยใช้สภาวะการนำกระแสและหยุดนำกระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังใช้แทนหน้าสัมผัสในส่วนของการตัด ต่อวงจร

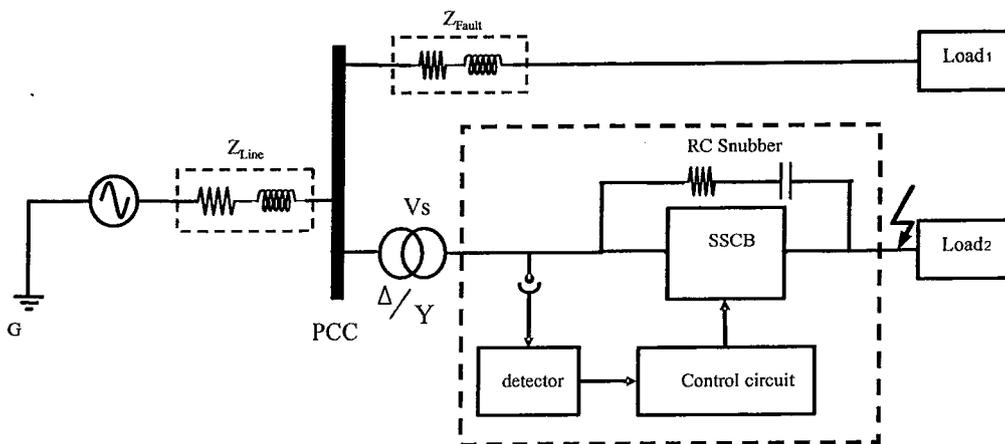
วัตถุประสงค์ในงานวิจัยนี้ เพื่อสร้างSSCB นำมาใช้กับระบบผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยกังหันลมช่วยแก้ปัญหาเมื่อเกิดแรงดันตก แรงดันเกิน กระแสไหลเกินและการลัดวงจรของโหลด ป้องกันสภาวะการอาร์คของหน้าสัมผัส ที่เป็นโทษของเซอร์กิตเบรกเกอร์ในช่วงเวลา ตัด - ต่อของระบบไฟฟ้า

#### 3.1 แนวคิดจำลองการออกแบบSSCB ด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK

ใช้จำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงต่ำ สภาวะผิดพลาดในระบบไฟฟ้า แรงดันต่ำ 3 เฟส โดยกำหนดให้เกิดความถี่วินาทีที่ 0.05 เป็นระยะเวลา 0.2 วินาที มีพารามิเตอร์ที่ใช้ในโปรแกรมดังนี้ แรงดันแหล่งจ่าย 3 เฟสด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงมีค่า 380 V ที่ความถี่ 50 Hz จำลองสภาวะกระแสลัดวงจร กระแสไหลเกิน แรงดันตก แรงดันเกิน จากรูปที่ 3.1 แสดงระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่ โดยที่  $Z_{Line}$  คือ ค่าความต้านทานกระแสสลับของแหล่งจ่ายที่จุด Point of Common Coupling (PCC) ค่าความต้านทานกระแสสลับระหว่างจุด PCC และ โหลด LOAD 1 คือ  $Z_1$  ค่าความต้านทานกระแสสลับจุด PCC และ โหลด LOAD 2 คือ  $Z_2$  เมื่อระบบจำหน่ายไฟฟ้าเกิดการผิดพลาด จะเกิดค่าความต้านทาน  $Z_f$  ซึ่งเรากำหนดให้ การผิดพลาดที่ ระหว่างจุด PCC กับ โหลด  $Z_1$  ในเงื่อนไขปกติสามารถกำหนดได้ดังต่อไปนี้



(ก) แบบจำลองการเกิดความผิดปกติแบบ Upstream



(ข) แบบจำลองการเกิดความผิดปกติแบบ Downstream

 รูปที่ 3.1 แบบจำลองการทำงานของระบบจำหน่ายไฟฟ้า  
กรณีเกิดความผิดปกติทั้ง 2 ตำแหน่ง

จากรูปที่ 3.1 (ก) เป็นการเกิดความผิดปกติแบบอยู่เหนืออุปกรณ์ป้องกัน ซึ่งการเกิดความผิดปกติในกรณีนี้ส่งผลให้ แรงดันไฟฟ้าในระบบมีการเปลี่ยนแปลง โดยการเปลี่ยนแปลงจะขึ้นอยู่กับ ชนิดของความผิดปกติที่เกิดขึ้น ดังสมการ

$$Z_{Line} = Z_1 // Z_2 \quad (3.1)$$

แรงดันที่จุด PCC คือ

$$\bar{V}_{PCC} = \frac{\bar{Z}_N}{\bar{Z}_{Line} + \bar{Z}_N} \quad (3.2)$$



$$V_{PCC} = \left| \frac{Z_N}{Z_{Line} + Z_N} \right| \quad (3.3)$$

$$\phi_{PCC} = \tan^{-1} \left( \frac{X_N}{R_N} \right) - \tan^{-1} \left( \frac{X_N + X_{Line}}{R_N + R_{Line}} \right) \quad (3.4)$$

เมื่อ

$Z_1 = R_1 + jX_1$	(โหลด Load 1 และ ค่าความต้านทาน $F_1$ )
$Z_2 = R_2 + jX_2$	(โหลด Load 2 และ ค่าความต้านทาน $F_2$ )
$\bar{V}_{PCC}$	แรงดันเฟสที่จุด PCC ในเงื่อนไขปกติ
$V_{PCC}$	ค่ายอดของแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC ในเงื่อนไขปกติ
$\phi_{PCC}$	ค่ามุมของแรงดันที่จุด PCC ในเงื่อนไขปกติ

เมื่อเกิดความผิดพลาดสมการแรงดันไฟฟ้าและมุมเฟสเปลี่ยนไปดังนี้

$$Z_{Fault} = Z_2 // Z_{Fault} \quad (3.5)$$

$$\bar{V}_{PCC(Fault)} = \frac{\bar{Z}_{Fault}}{Z_{Line} + \bar{Z}_{Fault}} \quad (3.6)$$

$$V_{PCC(Fault)} = \left| \frac{\bar{Z}_{Fault}}{Z_{Line} + \bar{Z}_{Fault}} \right| \quad (3.7)$$

$$\phi_{PCC(Fault)} = \tan^{-1} \left( \frac{X_{Fault}}{R_{Fault}} \right) - \tan^{-1} \left( \frac{X_{Fault} + X_{Line}}{R_{Fault} + X_{Line}} \right) \quad (3.8)$$

เมื่อ $Z_f = R_f + jX_f$	(ค่าความต้านทานระหว่างจุด PCC และจุด $F_1$ )
$Z_2 = R_2 + jX_2$	(โหลด Load 2 และ ค่าความต้านทาน $F_2$ )
$\bar{V}_{PCC(F)}$	แรงดันเฟสที่จุด PCC ในเงื่อนไขผิดพลาด
$V_{PCC(F)}$	ค่ายอดของแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC ในเงื่อนไขผิดพลาด
$\phi_{PCC(F)}$	ค่ามุมของแรงดันที่จุด PCC ในเงื่อนไขผิดพลาด [23]

จากรูปที่ 3.1 (ข) เป็นการเกิดความผิดพลาดแบบอยู่หลังอุปกรณ์ป้องกันหรือเรียกว่าการลัดวงจรของกระแสไฟฟ้า ซึ่งการเกิดความผิดพลาดในแบบนี้ส่งผลให้ กระแสไฟฟ้าในระบบมีการเปลี่ยนแปลง โดยการเปลี่ยนแปลงจะขึ้นอยู่กับ ชนิดของความผิดพลาดที่เกิดขึ้น ดังสมการ



## 1. การเกิดความผิดปกติแบบ 3 เฟสสมมาตร

$$I_a^1 = \frac{V_f}{Z_1 + Z_f}$$

เพราะฉะนั้น

$$I_a = \frac{V_f}{Z_1 + Z_f} \quad (3.9)$$

2. การเกิดความผิดปกติแบบเฟสเดียวลงดิน สมการกระแสหาค่ากระแสลัดวงจรแบบเฟสเดียวลงดิน

$$I_a^0 = I_a^1 = I_a^2 = \frac{V_f}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + 3Z_f} \quad (3.10)$$

## 3. การเกิดความผิดปกติแบบ 2 เฟส สมการกระแสหาค่ากระแสลัดวงจรแบบ 2 เฟส

$$I_a^1 = \frac{V_f}{Z_1 + Z_2 + Z_f} \quad (3.11)$$

## 4. การเกิดความผิดปกติแบบ 2 เฟสลงดิน ค่ากระแสลัดวงจร

$$I_a^1 = \frac{V_f}{Z_1 + \frac{Z_2 \times (Z_0 + 3Z_f)}{Z_2 + Z_0 + 3Z_f}} \quad (3.12)$$

$$I_a^0 = \frac{V_a^0}{Z_0}$$

$$I_a^2 = \frac{V_a^2}{Z_2} \quad (3.13)$$

หากระแสในแต่ละเฟส

$$I_{abc} = AI_a^{012} \quad (3.14)$$

จากการศึกษาสมการของการเกิดกระแสลัดวงจร พบว่าการเกิดความผิดปกติในระบบไฟฟ้าแต่ละชนิด กระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นแตกต่างกัน การจำลองสภาวะการเกิดความผิดปกติในระบบไฟฟ้าของงานวิจัยนี้มี 2 วิธี ศึกษารูปคลื่น ไฟฟ้าของ แรงดัน และกระแส เพื่อนำไปใช้สำหรับออกแบบวงจรตรวจจับความผิดปกติต่อไป



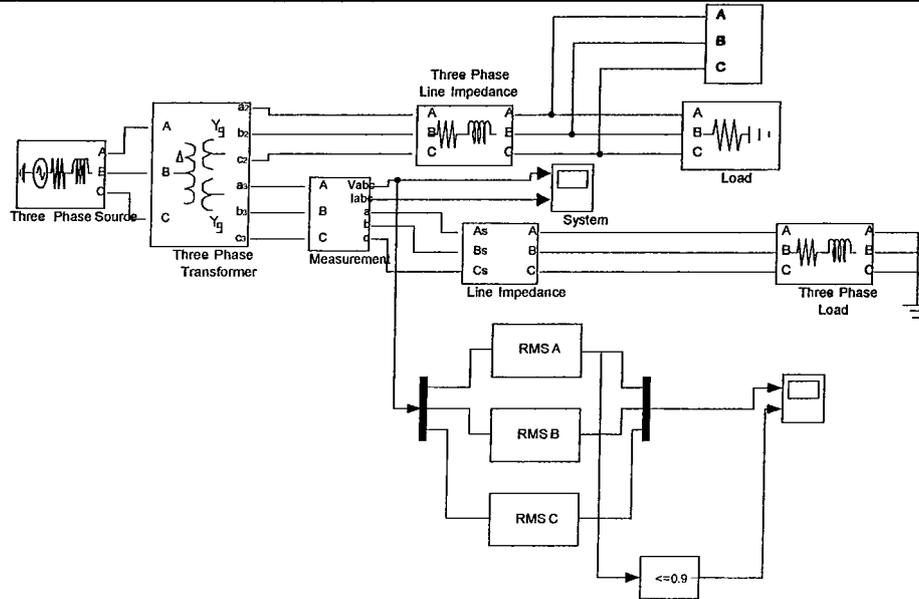
### 3.2 การตรวจจับความผิดพลาดในระบบด้วยวิธี Root Mean Square (RMS)

การศึกษาวิธีการตรวจจับแรงดันและกระแส จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้วยวิธีการต่างๆ เพื่อสั่งการให้อุปกรณ์ป้องกันทำงาน จึงเลือกใช้วิธีการตรวจจับแรงดันแบบ RMS เป็นวิธีการตรวจจับในงานวิจัยนี้ เพื่อนำไปสั่งการให้SSCB ทำงาน เนื่องจากความเร็วในการตรวจจับเมื่อระบบเกิดความผิดพลาดของอุปกรณ์ป้องกันในระบบไฟฟ้าใช้เวลาเป็น มิลลิวินาที ซึ่งถ้าตรวจจับด้วยความเร็วเกินไปก็ต้องมีการหน่วงเวลาเพื่อดูสภาวะการเกิดความผิดพลาดว่าเกินกว่ามาตรฐานที่กำหนดหรือไม่ [24-25]

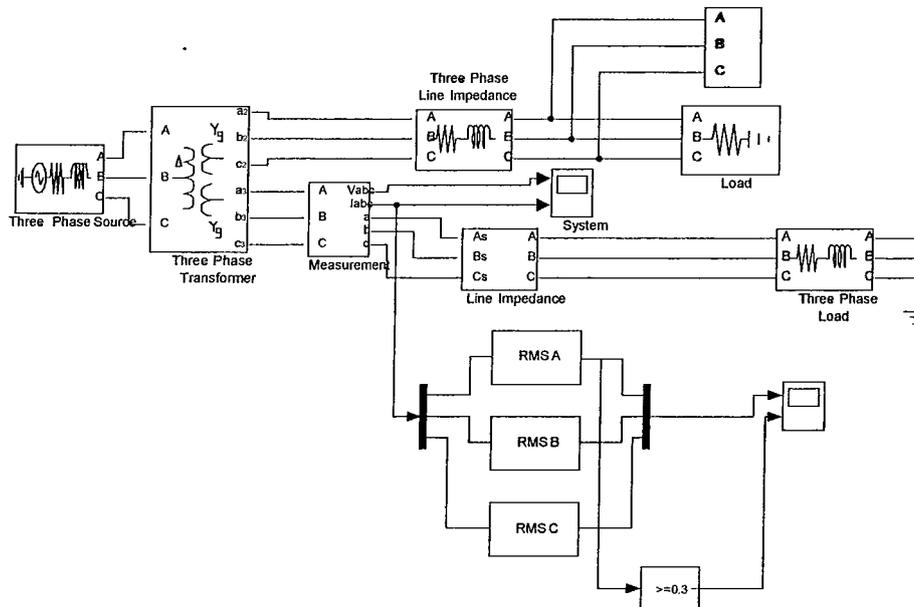
วิธีการคำนวณการตรวจจับแบบ RMS ใช้ค่าผลของแรงดันสัมประสิทธิ์เป็นค่าแรงดันที่ใช้ในระบบไฟฟ้ากระแสสลับมากที่สุดเป็นค่าแรงดัน RMS สามารถคำนวณได้จาก ลำดับคาบเวลาวิธีการแบบไม่ต่อเนื่อง หากค่า RMS ได้โดยสมการแบบไม่ต่อเนื่องพิจารณาวงรอบเดียว ดังสมการที่ 3.15 โดยแสดงสัญญาณแรงดัน RMS ออกมาในรูปของ per unit (p.u.) จากการจำลอง ทั้งสามเฟส จะเห็นว่าเวลาของการตรวจวัดค่า RMS ที่ต่ำกว่า 0.9 p.u. มีค่าเท่ากับ 0.0543 วินาที เมื่อเกิดความผิดพลาดที่ 0.05 วินาที [26] แสดงวงจรจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK การตรวจจับทั้งแรงดันและกระแส ดังรูปที่ 3.1 และ 3.2

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t=0}^{t+T} v^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N v_n^2} \quad (3.15)$$

$$I_{rms} = \frac{I_p}{\sqrt{2}} \quad (3.16)$$

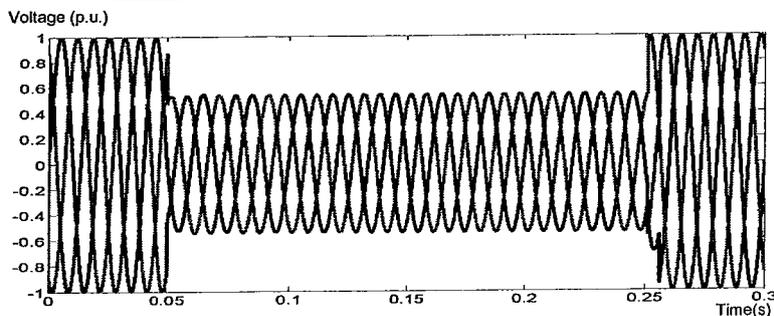


รูปที่ 3.2 วงจรทดสอบการตรวจจับแรงดันไฟฟ้าแบบ RMS

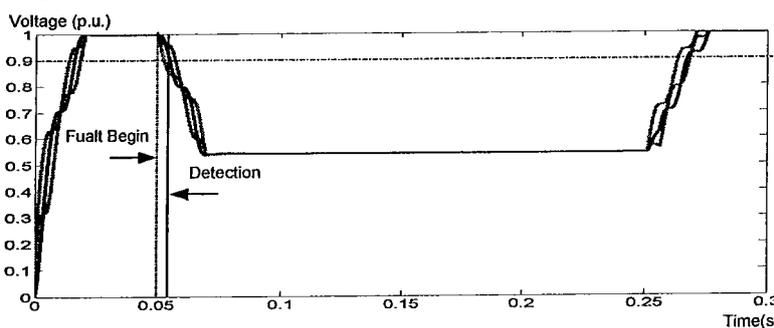


รูปที่ 3.3 วงจรทดสอบการตรวจจับกระแสไฟฟ้าแบบ RMS

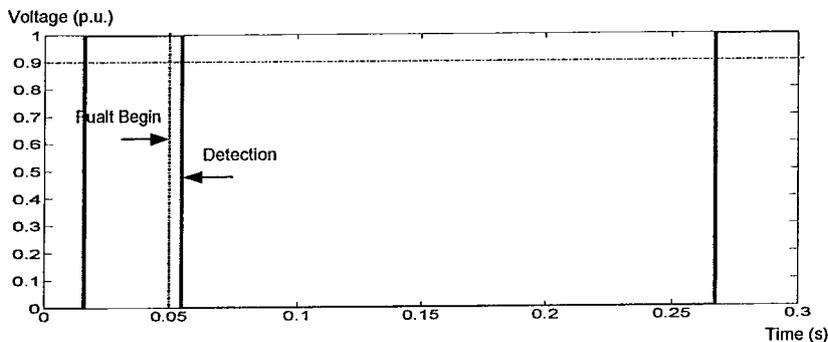
การทดสอบการตรวจจับแรงดันเมื่อเกิดความผิดปกติแบบ Upstream กับระบบจำหน่ายแรงดันต่ำเป็นเปอร์ยูนิต เริ่มทำงานที่เวลา 0.05 วินาที พบว่าเมื่อในระบบเกิดความผิดปกติแบบ 3 เฟส ที่เวลา 0.05 วินาที ถึงเวลา 0.25 วินาที แสดงวิธีการตรวจจับค่าแรงดันไฟฟ้าแบบ RMS เมื่อค่าแรงดัน RMS ต่ำกว่า 0.9 p.u.



รูปที่ 3.4 แรงดันไฟฟ้า 3 เฟส เมื่อเกิดความผิดปกติแบบ 3 เฟส

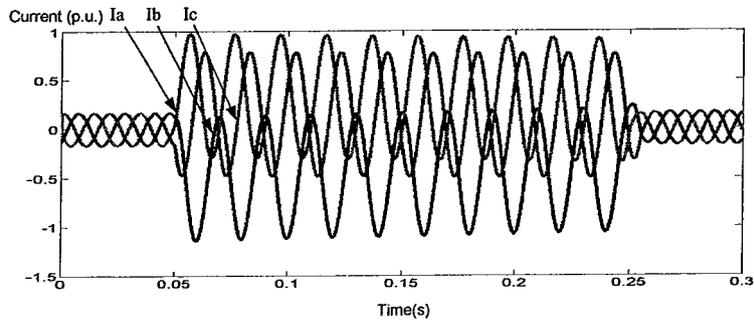
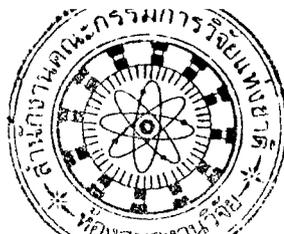


รูปที่ 3.5 แรงดัน RMS ของระบบไฟฟ้าเมื่อเกิดความผิดปกติที่เฟส a,b,c

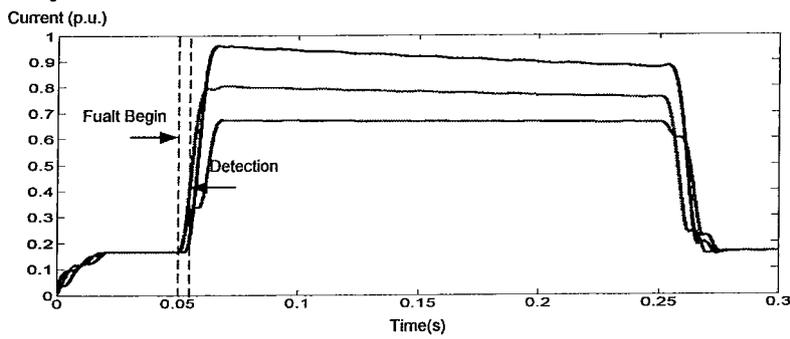


รูปที่ 3.6 สัญญาณที่ได้จากตัวตรวจจับแรงดัน RMS เกิดความผิดปกติแบบ 3 เฟส

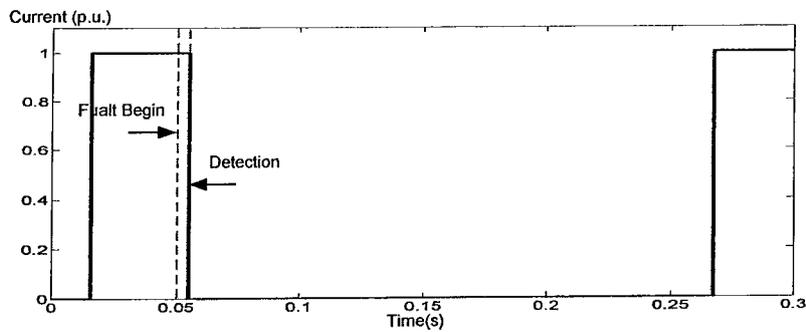
ทดสอบการตรวจจับกระแสเมื่อเกิดความผิดปกติแบบ Downstream กับระบบจำหน่ายแรงดันต่ำเป็นเปอร์ยูนิต เริ่มทำงานที่เวลา 0.05 วินาที พบว่าเมื่อในระบบเกิดความผิดปกติแบบ 3 เฟส ที่เวลา 0.05 วินาที ถึงเวลา 0.25 วินาที แสดงวิธีการตรวจจับค่ากระแสไฟฟ้าแบบ RMS เมื่อค่ากระแส RMS สูงกว่า 0.2 p.u.



รูปที่ 3.7 กระแสไฟฟ้า 3 เฟส เมื่อเกิดความผิดปกติแบบ 3 เฟส



รูปที่ 3.8 กระแส RMS ของระบบไฟฟ้าเมื่อเกิดความผิดปกติที่เฟส a,b,c

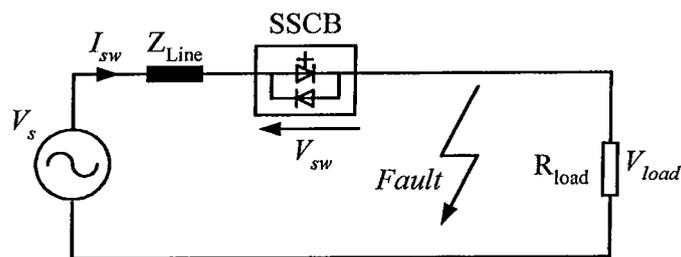


รูปที่ 3.9 สัญญาณที่ได้จากตัวตรวจจับกระแส RMS เกิดความผิดปกติแบบ 3 เฟส

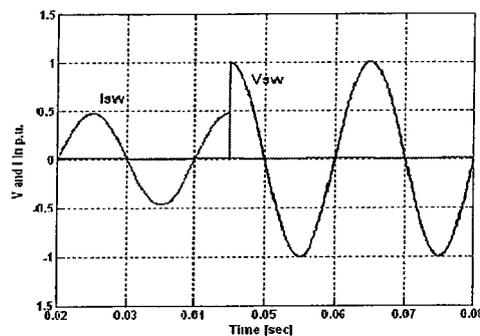


### 3.3 การออกแบบของเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบโซลิตสเทท

การออกแบบวงจรของSSCBใช้การวิเคราะห์คุณสมบัติพื้นฐานของการนำสารกึ่งตัวนำมาเป็นสวิทช์ในการตัด - ต่อวงจรไฟฟ้า จากรูปที่ 3.10 เป็นวงจรสมมูล 1 เฟส เพื่อการนำเสนอให้เห็นแรงดันจากแหล่งจ่ายและความต้านทานในระบบสายส่ง แสดงวงจรอุคมคติเมื่อเกิดความผิดพลาดในระบบ รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมSSCBมีค่าเท่าแรงดันในระบบขณะตัดวงจร และกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน SSCB มีค่าเป็นศูนย์ในทางอุคมคติ ดังแสดงในรูปที่ 3.11

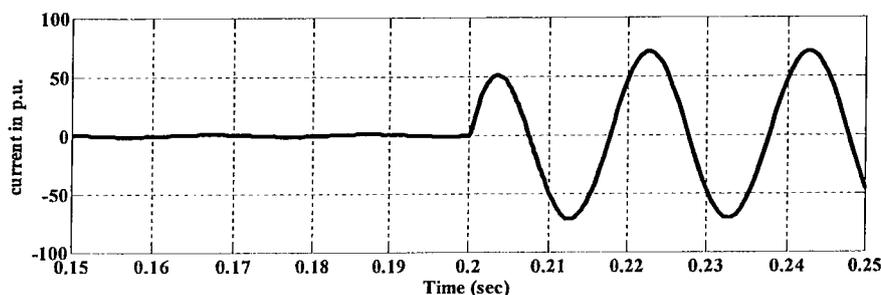


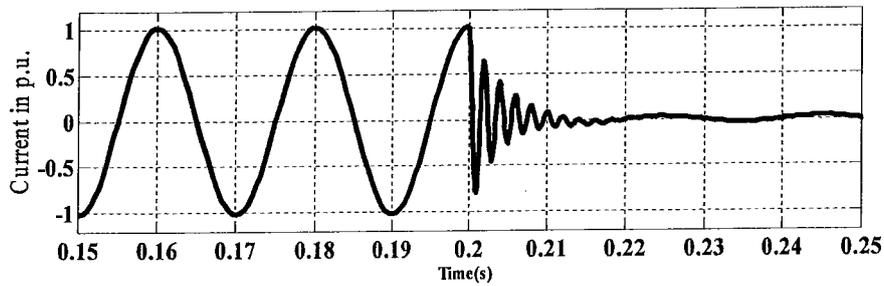
รูปที่ 3.10 จำลองวงจรป้องกันของSSCB ในระบบไฟฟ้า 1 เฟส



รูปที่ 3.11 จำลองรูปคลื่นการตัดวงจรของSSCBในอุคมคติ

ผลการทดลองเบื้องต้นจากการใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK จำลองการเกิดความผิดพลาดในช่วงเวลา 200 มิลลิวินาที จำลองโดยใช้ลักษณะโครงสร้างของไอจีบีที ในอุคมคติมาวิเคราะห์เพื่อความเป็นไปได้ในการสร้างSSCB



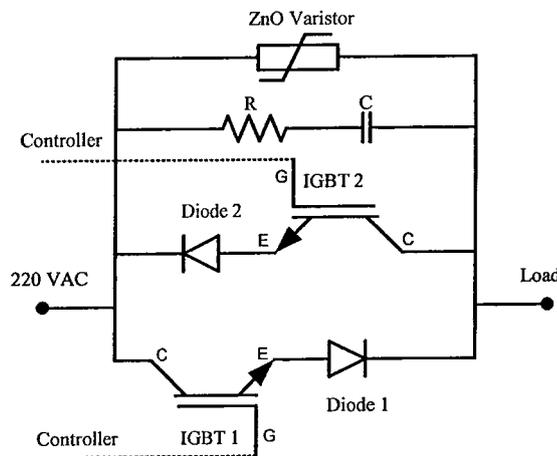


รูปที่ 3.12 แรงดันและกระแสไฟฟ้าเมื่อเกิดความผิดปกติในระบบขณะที่SSCBตัดวงจร

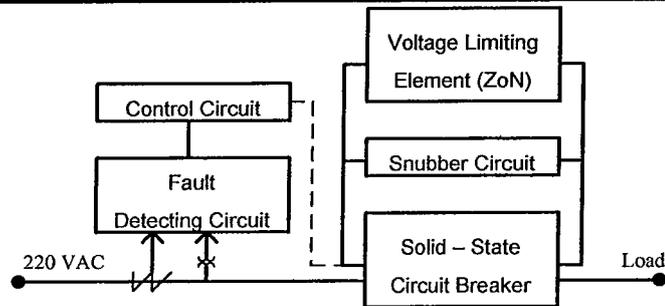
### 3.3.1 การออกแบบวงจรภายในของเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบโซลิตสเทท

เป็นการนำพื้นฐานของสารกึ่งตัวนำที่มีความเร็วในการสวิตช์สูง และในปัจจุบัน อัตราการทนกระแสของสารกึ่งตัวนำมีสูง จากวงจรแสดงภาพรวมการออกแบบเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบโซลิตสเทท ประกอบด้วย

- IGBT
- RC snubber
- ไดโอด
- varistor



รูปที่ 3.13 วงจรกำลังSSCBโมเดลไอจีบีที



รูปที่ 3.14 การตรวจจับความผิดปกติและส่งสัญญาณเพื่อไปจุดขนวนขาเกิดของไอจีบีที

จากรูปที่ 3.14 แสดงการตรวจจับความผิดปกติของระบบ การตรวจจับด้วยวิธี RMS เมื่อแรงดันไฟฟ้ามีค่าต่ำกว่า 0.9 p.u. กระแสลัดวงจรมีค่าสูงกว่า 0.2 p.u. ส่งสัญญาณเพื่อไปจุดขนวนที่ขาเกิดของไอจีบีที พร้อมกันเพื่อตัดวงจรออกจากระบบ

### 3.3.2 การออกแบบสับเบรคของวงจรถูก

ในช่วงระหว่างเริ่มนำกระแสและขณะที่นำกระแสแล้ว จุดการทำงานของ IGBT จะต้องมีความเร็วแรงดันและกระแสที่ขาแคโรนอยู่ในพื้นที่การทำงานที่ปลอดภัยในช่วงไบแอสตรง เสมอ เพราะจะทำให้เกิดการเสียหายขึ้นที่ IGBT พื้นที่การทำงานที่ปลอดภัยของ IGBT แสดงถึงขีดจำกัดของกระแสแคโรน อัตราแรงดันไหลตรง และอุณหภูมิรอยต่อของ IGBT สำหรับพื้นที่การทำงานที่ปลอดภัยในช่วงไบแอสกลับ (reverse bias safe operating area : RBSOA) จะแตกต่างจากค่าจำกัดของค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดัน ที่ขาแคโรนต่อเวลา (DVds/DT) จะเกิดขึ้นในช่วงระหว่างหยุดนำกระแส แทนขีดจำกัดทางด้านอุณหภูมิรอยต่อ และ จะมีพื้นที่แคบลงถ้า DVds/DT มีค่าสูงมากขึ้น และไม่ต้องการให้เกิดการแลตซ์ขึ้นที่ IGBT ค่า DVds/DT นี้จะมีผลโดยตรงกับช่วงเวลาหยุดนำกระแส คือ ถ้ามีอัตราการเปลี่ยนแปลงเร็วจะทำให้ช่วงเวลาหยุดนำกระแสน้อย ดังนั้นขีดจำกัด DVds/DT ของ IGBT มีค่าสูงมาก เมื่อเทียบกับอุปกรณ์ไทรสเตอร์ตัวอื่น ๆ จึงมีความจำเป็นในการใช้วงจรถูกเบรคเพื่อป้องกันการแลตซ์ จากเหตุผลดังกล่าวเพื่อนำเอา IGBT ไปใช้งานได้ถูกต้องและมีประสิทธิภาพ



สามารถคำนวณ RC สนับเบอรี่ได้จาก

$$V_s = 220V$$

$$I_L = 20A$$

$$F_s = 5kHz.$$

$$t_{f1} = 200ns \quad t_{d(OFF)1} = 240ns \quad \therefore t_f = t_{f1} + t_{d(OFF)1} = 440ns \text{ (ค่าที่ได้จาก$$

Datasheet ของIGBT ที่เลือกใช้)

Duty cycle 50 %

$$C = \frac{I_L \times t_f}{2V_s} = \frac{20 \times 440 \times 10^{-9}}{2 \times 220} = 0.02 \mu F \quad (3.17)$$

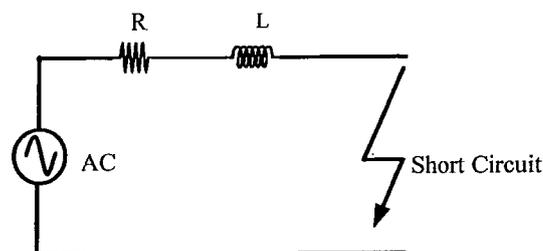
$$T_s = \frac{1}{f_s} = \frac{1}{5 \times 10^3} = 20ms \quad (3.18)$$

การนำกระแส Duty cycle 50 % เท่ากับ 10ms

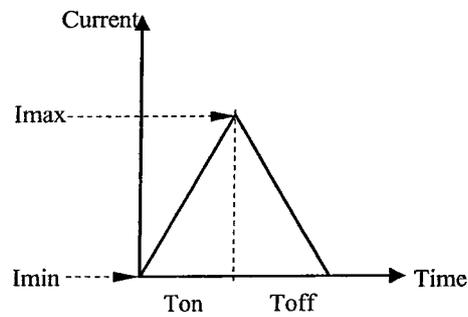
$$R < \frac{t_{on}}{5c} < \frac{10 \times 10^{-3}}{5 \times 0.02 \times 10^{-6}} < 100k\Omega \quad (3.19)$$

### 3.3.3 การคำนวณเวลาการสวิตชิงของ ไอจีบีที

การคำนวณความถี่สวิตชิง การคำนวณภายใต้สภาวะกระแสลัดวงจรในระบบไฟฟ้า  
กำลังจากวงจรสมมูล อุปกรณ์สวิตซ์ทำหน้าที่เปิดวงจรออกจากสภาวะการลัดวงจร



รูปที่ 3.15 ความผิดปกติในวงจรไฟฟ้าการทดสอบด้วยโปรแกรม



รูปที่ 3.16 Rising edge of fault current

ค่าเวลาของ  $T_{on}$  สามารถหาได้จากสมการ

$$T_{on} = \frac{-L}{R} \times \ln \frac{\left(\frac{v}{R} - I_{max}\right)}{\left(\frac{v}{R} - I_{min}\right)} \quad (3.20)$$

เนื่องจากเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ

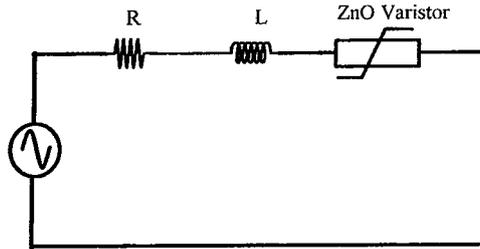
$$v = \sqrt{2} \times V_{rms} \times \sin \omega t \quad \text{เมื่อ } \omega t \text{ เป็นค่าเวลาที่เกิดขึ้นในการสวิตช์}$$

เพราะฉะนั้น

$$T_{on} = \frac{-L}{R} \times \ln \frac{(\sqrt{2} \times V_{rms} \times \sin \omega t / R - I_{max})}{(\sqrt{2} \times V_{rms} \times \sin \omega t / R - I_{min})} \quad (3.21)$$



เมื่ออุปกรณ์สวิตช์ในสถานะเปิดวงจร ทำหน้าที่คล้ายวาริสเตอร์



รูปที่ 3.17 สถานะที่อุปกรณ์สวิตช์ในเปิดวงจร

ค่าเวลาของ  $T_{off}$  สามารถหาได้จากสมการ

$$T_{off} = \frac{-L}{R_1} \times \ln \frac{\left( \frac{v - V_c}{R_1 - I_{min}} \right)}{\left( \frac{v - V_c}{R_1 - I_{max}} \right)} \quad (3.22)$$

$$T_{off} = \frac{-L}{R_1} \times \ln \frac{\left( \frac{\sqrt{2} \times V_{rms} \times \sin(\omega t + T_{on}) - V_c}{R_1 - I_{min}} \right)}{\left( \frac{\sqrt{2} \times V_{rms} \times \sin(\omega t + T_{on}) - V_c}{R_1 - I_{max}} \right)} \quad (3.23)$$

สมการที่ 16 ให้สัญญาณพัลส์ ( $T_p$ ) เป็นมุมในการสวิตช์

$$T_p = T_{on} + T_{off} \quad (3.24)$$

ค่าของเวลาที่ได้จากการคำนวณ  $T_p$  โดยค่าของสัญญาณพัลส์ (N) ต่อ แต่ละครั้งรูปคลื่น หาได้จากสมการ

$$N = \frac{10 \times 10^{-3}}{T_{p(av)}} \quad (3.25)$$

ความถี่สวิตช์ (F) ของ ไอจีบีที แต่ละตัว สามารถหาได้จากสมการ

$$F = N \times 50 \quad (3.26)$$



### 3.3.4 การคำนวณหาค่าวาริสเตอร์ระหว่างที่เกิดความผิดพลาดในวงจร

การคำนวณหาค่าของวาริสเตอร์มีพื้นฐานมาจากสมการคำนวณหาความถี่สวิตช์ซึ่งค่าพลังงานในการซึมซับของวาริสเตอร์ในช่วงเวลาที่เกิดความผิดพลาด หาได้จากสมการ

$$E = V_c \times I_{max} \times T_{off(av)} \times N \quad (3.27)$$

เมื่อ

- E คือ พลังงานในการซึมซับของวาริสเตอร์ ในหนึ่งรูปคลื่น  
 $V_c$  คือ ค่าแรงดันไฟฟ้ารวมของวาริสเตอร์ เมื่อ  $I = I_{max}$  (ค่าจาก Data sheet)  
 $T_{off(av)}$  คือ ค่าเฉลี่ยของเวลาในการ Turn off  
 N คือ จำนวนของพัลส์ ต่อ แต่ละครึ่งรูปคลื่น

ในกรณีที่  $I_{min} > 0$  กระแสความผิดพลาดที่ผ่านไปยัง ไอจีบีที เมื่อ  $i = I_{min}$  และ กระแสที่ไหลผ่านวาริสเตอร์ มีค่าลดลงเป็นศูนย์ สามารถคำนวณค่าของพลังงานที่ไหลผ่าน ได้จากสมการ

$$E = V_c \times I_{max} \times T_{Off(av)} \times N \times \left(1 + \frac{I_{min}}{I_{max}}\right) \quad (3.28)$$

### 3.3.5 การใช้ไดโอดในวงจร

ทำหน้าที่คือ นำกระแส (Forward Bias) แรงดันที่ตกคร่อมจะมีค่าต่ำ (~1 โวลต์) ในทางตรงกันข้ามเมื่อเกิดหยุดนำกระแส (Reverse Bias) กระแสจะไหลผ่านได้น้อยมาก (~1 ไมโครแอมป์) ถ้า แรงดันย้อนกลับมีค่าสูงเกิน Reverse Blocking Region จะทำให้ไดโอดพังได้

ประเภทของไดโอดที่สำคัญ

- Schottky Diode มีค่า forward bias ต่ำ (0.3 โวลต์) ใช้กับไฟแรงดันต่ำ (50 -100 โวลต์)
- Fast-Recovery Diode ออกแบบมาใช้กับวงจรสวิตช์ซึ่งเพราะใช้งานกับความถี่สูงและมีค่า Reverse-recovery time ( $t_{rr}$ ) ต่ำ (นาโนวินาที) ไดโอดที่นำมาจำลองค่าพารามิเตอร์
- Line-Frequency Diode มีค่า  $t_{rr}$  สูงจึงใช้ในความถี่ต่ำ (50Hz.) แต่ พิกัดของกระแสและ แรงดันไฟฟ้ามีค่าสูงมาก เมื่อไดโอด กำลังจะ Turn off กระแสจะไหลจากบวกไปเป็น 0 แต่ ไดโอดต้องการกระแสบางส่วนที่เป็นลบเพื่อที่จะทำให้ตัวมัน off ในช่วงเวลานี้กระแสจะไหลเป็นลบ

ไดโอดที่นำมาวิเคราะห์เป็นไดโอดชนิด Ultra fast Dual Diode เบอร์ RURG3020CC ชนิดนี้มีเวลาในการฟื้นตัว ( $t_{rr}$ ) เร็วมากในการสวิตช์ ที่ 50 นาโนวินาที ขนาดพิกัดแรงดันที่ตกคร่อม ไดโอด 200 โวลต์ กระแสที่ไหลผ่านไดโอดเท่ากับ 30 แอมป์แอมป์



### 3.3.6 ทดสอบเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบโซลิตสเตทต่อวงจรเข้าในระบบไฟฟ้า 1 เฟส

การทดสอบต่อวงจรของSSCBต่อเข้าในระบบไฟฟ้า 1 เฟส ทำการวิเคราะห์ โดยการเปลี่ยนแปลงโหลด เพื่อศึกษา สภาวะปกติของวงจรไฟฟ้า กับสภาวะเกิดการลัดวงจรขึ้นในระบบไฟฟ้าและSSCB ทำการตัดวงจรออก

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ของไอจีบีทีที่ใช้ในการออกแบบ

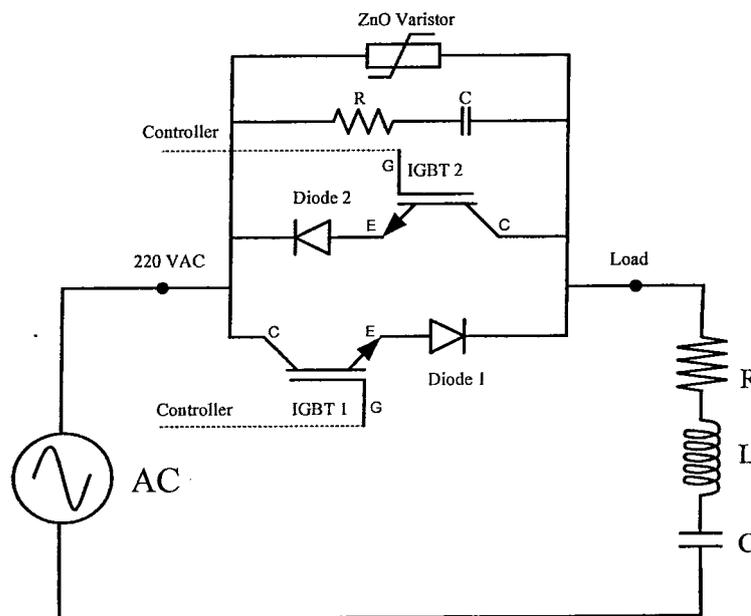
กระแสสูงสุดที่สามารถทนได้	54 A	$T_C=25^{\circ}\text{C}$
แรงดันสูงสุดที่สามารถทนได้	1200 V	
แรงดันตกคร่อมขณะนำกระแสและการทำงานที่ขึ้นต่ออุณหภูมิ	$V_{EC} = 2.6 \text{ V}$	$I_{EC} = 18\text{A}$
กระแสไฟฟ้าวัดขณะไม่นำกระแส	$I_{CES} = 300 \mu\text{A}$	$T_C = 125^{\circ}\text{C}$
ความร้อนที่สามารถใช้งานได้	$R_{\theta JC} = 0.32^{\circ}\text{C/W}$	
เวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะจากนำกระแสเป็นหยุดนำกระแส	$t_{d(ON)} I = 21 \text{ ns}$	
เวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะจากหยุดกระแสเป็นนำกระแส	$t_{d(OFF)} I = 205 \text{ ns}$	
ความสามารถในการทนต่อ $d_v / d_t$ เมื่อสวิตช์ไม่นำกระแส หรือขณะเริ่มนำกระแส	ขึ้นอยู่กับ ความสามารถในการ ทนแรงดันสูงสุด	
ความสามารถในการทนต่อ $d_t / d_v$ เมื่อสวิตช์นำกระแส หรือขณะเริ่มนำกระแส	ขึ้นอยู่กับ ความสามารถในการ ทนกระแสสูงสุด	
ความสามารถในการทนต่อทั้งกระแสและแรงดันไฟฟ้าสูงอย่างทันทีทันใด		$t_{sc} = 15 \mu\text{s}$
ความต้านทานภายในของ IGBT		$0.01 \Omega$
ค่าความเหนี่ยวนำ		$1 \mu\text{H}$

หมายเหตุ การควบคุม  $d_t / d_v$  และ  $d_v / d_t$  ก็เพื่อให้สวิตช์ทำงานอยู่ในบริเวณการทำงานปลอดภัย หรือ SOA (Safe Operation Area = บริเวณแรงดันและกระแสสูงสุดที่สวิตช์สามารถทำงานได้ปกติ) เมื่อ  $R_G = 0.01 \Omega$  ,  $V_{GE} = 15 \text{ V}$  ,  $L = 1 \mu\text{H}$



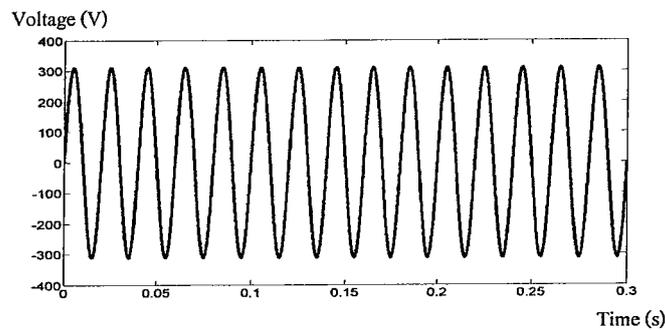
ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์ของไอจีบีทีที่ใช้ในการออกแบบSSCB

พารามิเตอร์ของแหล่งจ่าย		
Vac	$220 \times \sqrt{2}$ V	50 Hz.
พารามิเตอร์ของโหลด		
$R_L$	$9 \Omega$	
$L_L$	$0.02$ H	
$C_L$	$1 \mu F$	

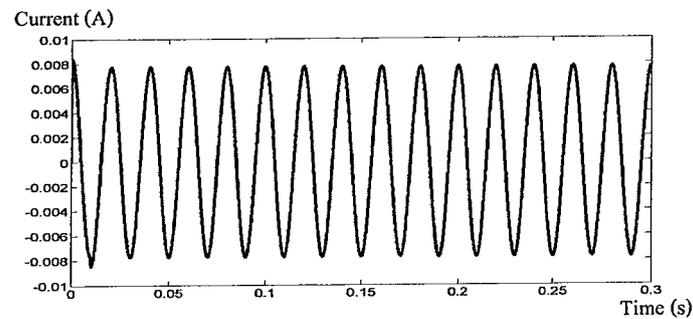


รูปที่ 3.18 การต่อSSCBเข้ากับวงจรไฟฟ้า

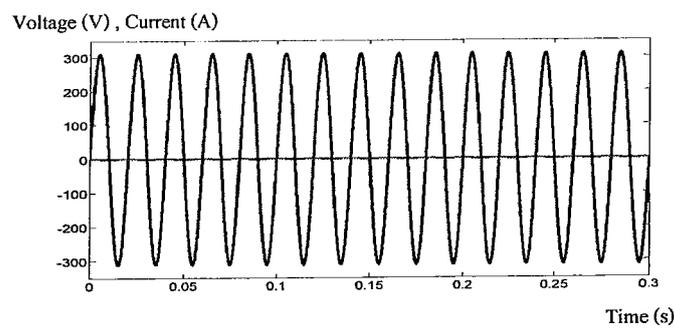
1. วิเคราะห์ห้วงจรรูปคลื่นไฟฟ้าเมื่อต่อเข้ากับโหลด R



(ก) แรงดันไฟฟ้าในสภาวะปกติ



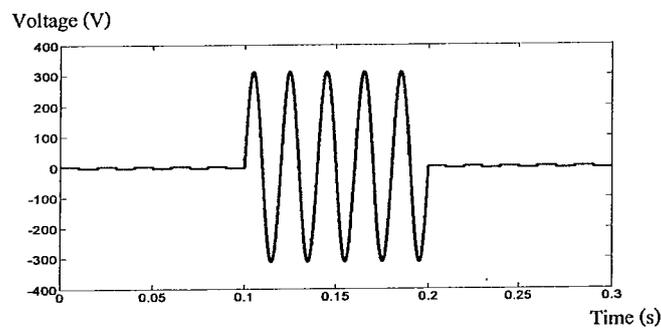
(ข) กระแสไฟฟ้าในสภาวะปกติ



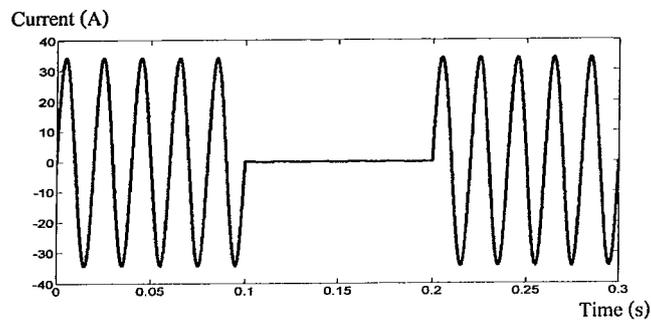
(ค) แรงดัน และกระแสไฟฟ้าในสภาวะปกติ

รูปที่ 3.19 รูปคลื่นของแรงดันและกระแสไฟฟ้า ในสภาวะปกติ

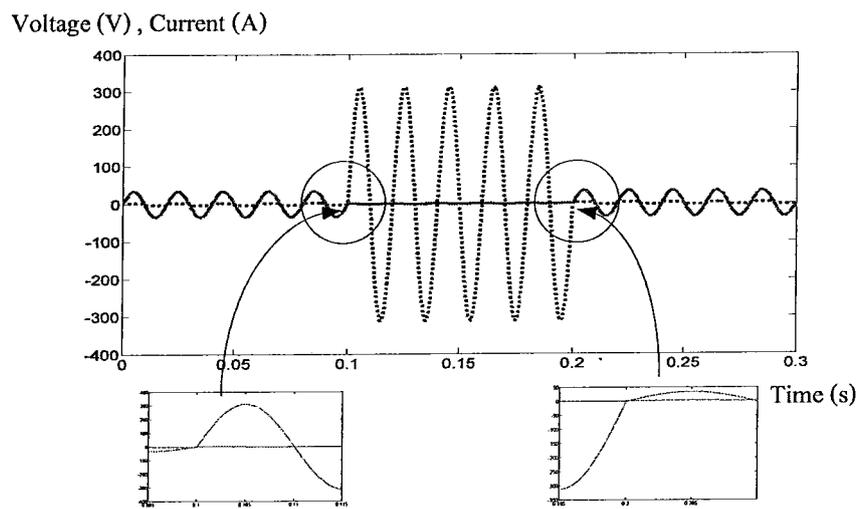
รูปคลื่นไฟฟ้าเมื่อต่อเข้ากับโหลด R เมื่อเกิดความผิดปกติในระบบไฟฟ้าที่ 0.1 วินาที และต่อวงจรที่เวลา 0.2 วินาที ศึกษาการตัดต่อวงจรของ SSCB



(ง) แรงดันไฟฟ้าตัดวงจรที่เวลา 0.1 และต่อวงจรที่เวลา 0.2 วินาที



(ข) กระแสไฟฟ้าตัดวงจรที่เวลา 0.1 และต่อวงจรที่เวลา 0.2 วินาที

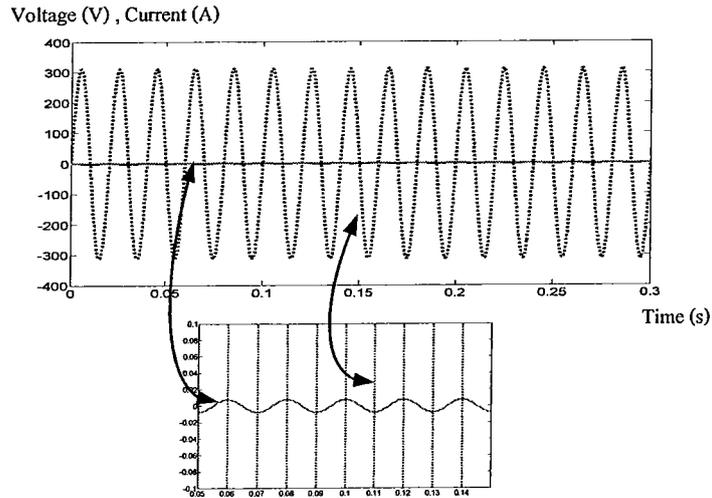


(ค) แรงดัน และกระแสไฟฟ้าตัดวงจรที่เวลา 0.1 และต่อวงจรที่เวลา 0.2 วินาที

รูปที่ 3.20 รูปคลื่นการทดสอบการ ตัด – ต่อวงจรSSCBเมื่อต่อกับ  
แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ โหลด R

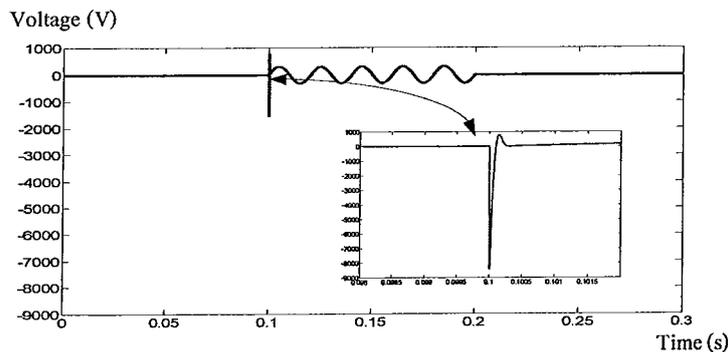


### 2. วิเคราะห์วงจรรูปคลื่นไฟฟ้าเมื่อต่อเข้ากับโหลด RL

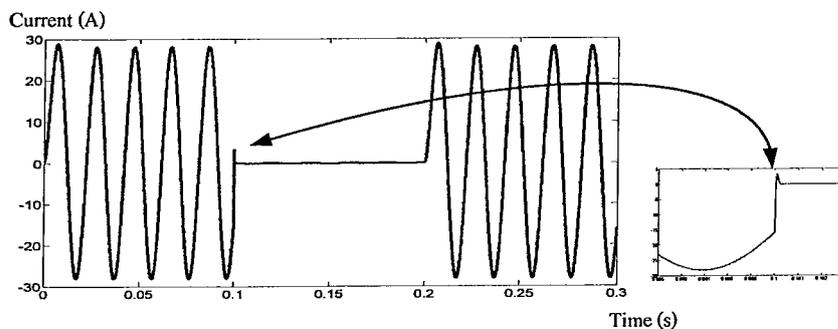


รูปที่ 3.21 แรงดันและกระแสไฟฟ้า ในสภาวะปกติ เมื่อโหลดเป็น RL

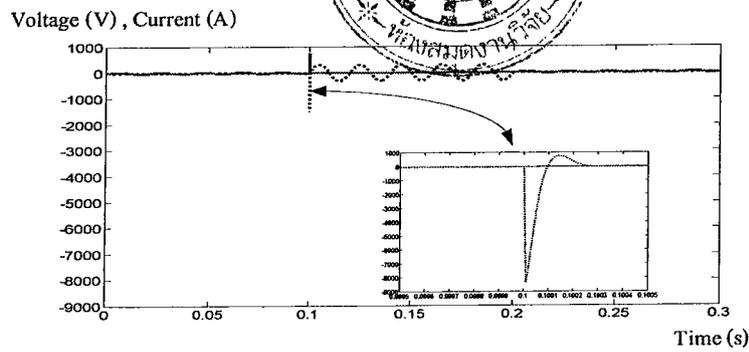
รูปคลื่นไฟฟ้าเมื่อต่อเข้ากับโหลด RL เมื่อเกิดความผิดปกติในระบบไฟฟ้าที่ 0.1 วินาที และต่อวงจรที่เวลา 0.2 วินาที ศึกษาการตัดต่อวงจรของ SSCB



(ก) แรงดันไฟฟ้าตัดวงจรที่เวลา 0.1 และต่อวงจรที่เวลา 0.2 วินาที



(ข) กระแสไฟฟ้าตัดวงจรที่เวลา 0.1 และต่อวงจรที่เวลา 0.2 วินาที



(ค) แรงดัน และกระแสไฟฟ้าตัดวงจรที่เวลา 0.1 และต่อวงจรที่เวลา 0.2 วินาที

รูปที่ 3.22 การทดสอบการ ตัด – ต่อวงจรSSCB เมื่อต่อกับ

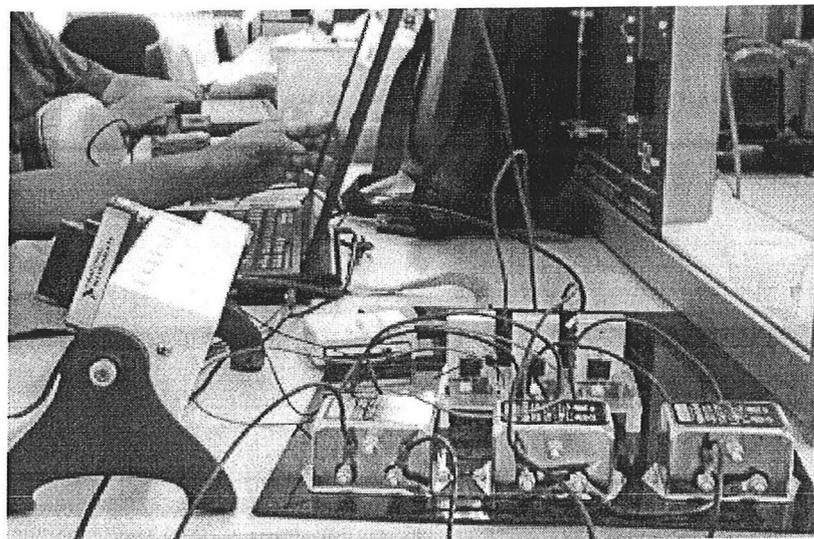
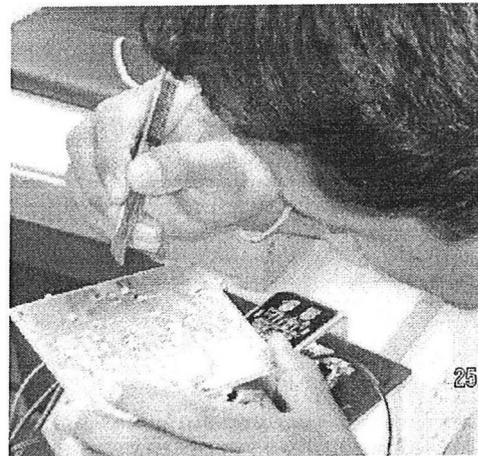
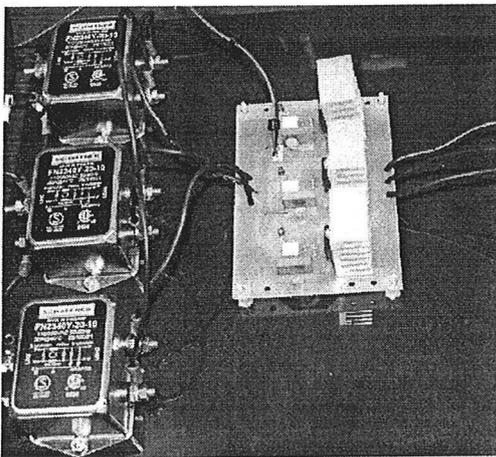
แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ โหลด RL

รูปคลื่น ไฟฟ้าเมื่อต่อเข้ากับโหลด RL เมื่อเกิดความผิดปกติในระบบไฟฟ้าที่ 0.1 วินาที และต่อวงจรที่เวลา 0.2 วินาที ศึกษาการตัด ต่อวงจรของ SSCB

### 3.3.7 การออกแบบสร้าง SSCB

การจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ได้นำวิธีการตรวจนับแบบRMS มาสร้างการตรวจนับขนาดของแรงดัน และกระแส และนำการออกแบบมาสร้างวงจรตัด ต่อระบบ SSCB นำมาใช้งานจริง โดยแยกส่วนของวงจรตัด ต่อวงจร และส่วนตรวจนับความผิดพลาดในระบบในส่วนตรวจนับสามารถกำหนดขอบเขตของค่าแรงดัน RMS สูงสุด และต่ำสุด แรงดันสูงสุด ต่ำสุด ความถี่สูงสุด ต่ำสุด โดยสามารถคำนวณและกำหนดจากระบบ ส่วนขอบเขตของกระแสสูงสุดสามารถกำหนดจากระบบแต่ไม่เกินค่ากระแสสูงสุดที่ตัวอุปกรณ์ SSCB ทนได้คือ 20 A

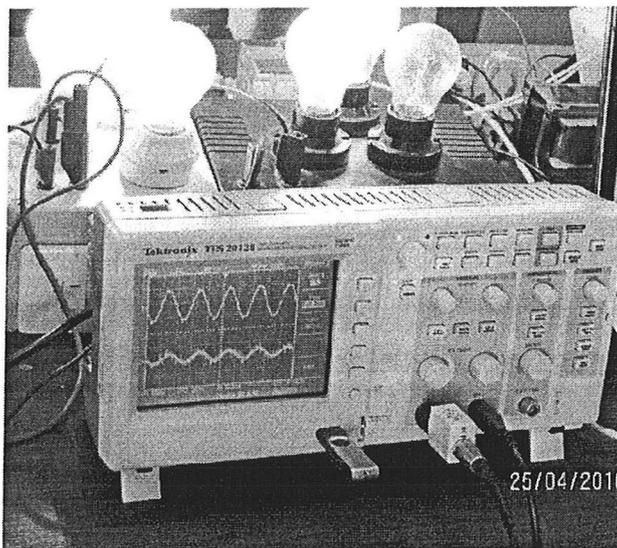
1. ส่วนตัด ต่อวงจร ทำการสร้างวงจรตามข้อมูลที่ได้จากการ จำลองระบบ



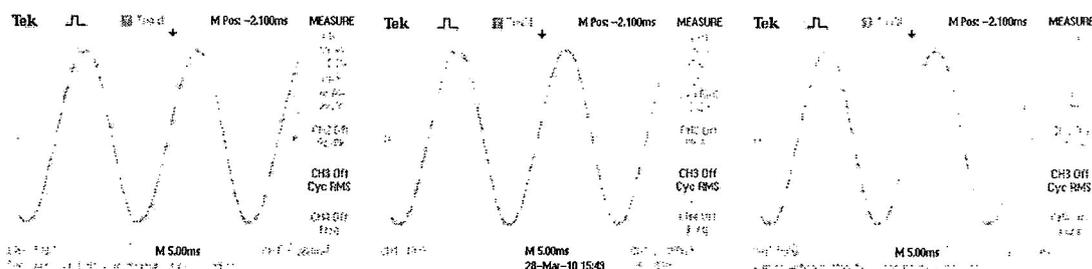
รูปที่ 3.23 สร้างวงจรถูกกำลังของSSCB โมเดลไอจีบีที



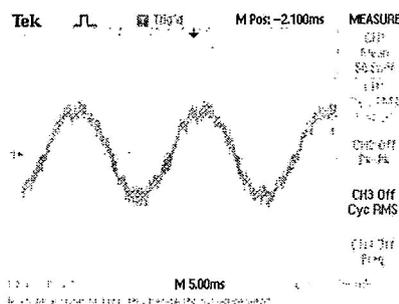
จากรูปประกอบด้วยชุดตัด ต่อดวงจร SSCB ชุด Filter กรองสัญญาณรบกวน RC สนับเบอร์วาริสเตอร์ และการทดสอบรูปคลื่นแรงดัน กระแสขณะทำงานของชุด SSCB



รูปที่ 3.24 ทดสอบSSCB กระแส และแรงดันต่อเฟส



รูปที่ 3.25 แรงดันไฟฟ้า L1-N, L2-N, L3-N ขณะเปิดวงจรของ SSCB วัดค่าโดยสโคป

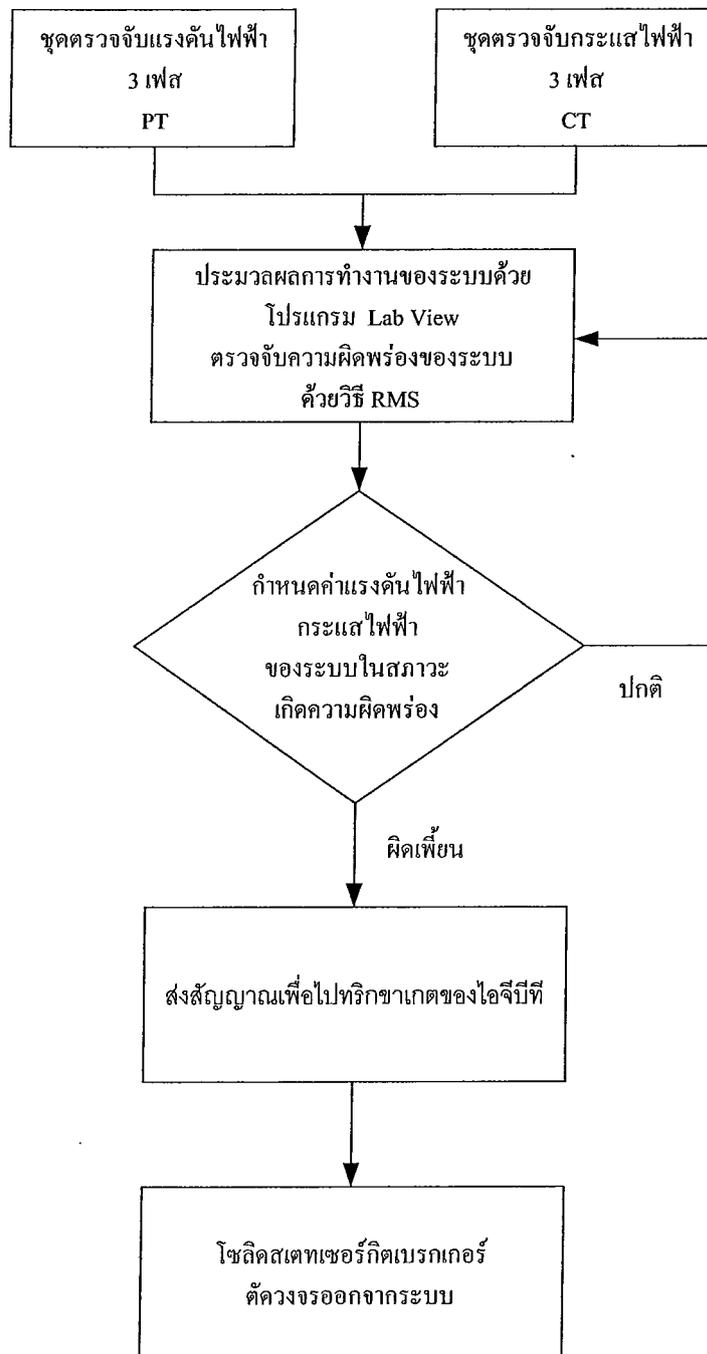


รูปที่ 3.26 แรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรของ SSCB วัดค่าโดยสโคป

รูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้าต่อเฟส เมื่อเชื่อม SSCB เข้ากับวงจร ขณะต่อดวงจร และรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าขณะตัดวงจร ซึ่งมีแรงดันตกคร่อม SSCB อยู่ที่ 0.52 โวลต์



2. ออกแบบระบบการวัด การบันทึก การแสดงผลแบบเวลาจริงการจำลองระบบไฟฟ้าเพื่อตรวจสอบสถานะที่ระบบเกิดความผิดปกติโดยอะแกรมการทำงาน (Block Diagram)



รูปที่ 3.27 แสดงบล็อกไดอะแกรมการทำงาน

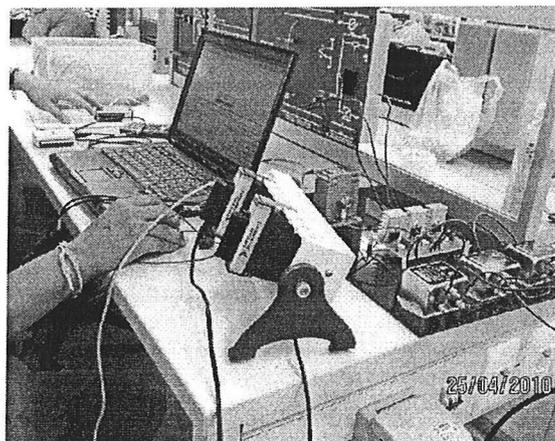


จากรูปที่ 3.27 จากบล็อกไดอะแกรมการทำงาน อธิบายการทำงานได้ว่า เมื่อมีสัญญาณจากตรวจจับแรงดัน (PT) และตรวจจับกระแส (CT) สัญญาณที่ได้เป็นสัญญาณอนาล็อก ส่งผ่านอุปกรณ์แปลงข้อมูลที่เป็นสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลจำนวน 4 พอร์ตและปรับการสื่อสารข้อมูลเข้าไปที่คอมพิวเตอร์ควบคุม โดย เลือกใช้ อุปกรณ์ของเนชั่นแนลอินสทรูเมนต์ (NI) ซึ่งเรียกรวมว่า ตัวรับและกระจายข้อมูลอินพุต/เอาต์พุต (Distribution I/O) แล้วเข้าสู่ชุดประมวล Lab View ประมวลผลสัญญาณที่เกิดขึ้นแต่ละช่วงการประมวลผลจะผ่านการควบคุม จากชุดคำสั่งโปรแกรม และจะมีการส่งงานผ่านทางคีย์บอร์ด สมมุติว่าเมื่อมีชุดกระแสหรือชุดแรงดันเกิดสภาวะแรงดันเกินหรือกระแสเกิน โปรแกรมประมวลผลของ Lab View จะส่งสัญญาณไปสั่งให้ SSCBเปิดวงจรตามโปรแกรมที่เขียนขึ้น

- เครื่องมือวัดที่ใช้ในการวัดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าในโครงการนี้ใช้ CT และ PT ในการตรวจจับรูปคลื่นของแรงดันและกระแส และลดขนาดของแรงดันและกระแสเพื่อให้มีแรงดันที่สามารถต่อเข้ากับ DAQ เบอร์ด NI 9201 รับสัญญาณ Input ของแรงดัน 1 Chanel Input ของกระแส 3 Chanel ประมวลผลด้วยโปรแกรม Lab View ซึ่งสามารถกำหนดขอบเขตของ แรงดัน RMS กระแส RMS แรงดันสูงสุด กระแสสูงสุด ขอบเขตความถี่ระบบ และแปลงข้อมูลที่เป็นสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลจำนวน 3 พอร์ตเพื่อไปจุดขนวนขาเหตุการณ์ที่ระบบเกิดความผิดปกติขึ้นและสามารถเชื่อมดูสถานะของระบบออนไลน์ จาก Website โดยส่งผ่านระบบ LAN มีรายละเอียดของโมดูลต่างๆ ดังต่อไปนี้

ก. โมดูลแอนะล็อกอินพุต NI 9201 8 ช่องสัญญาณ ขนาด 12-Bit Analog Input Module, C Series

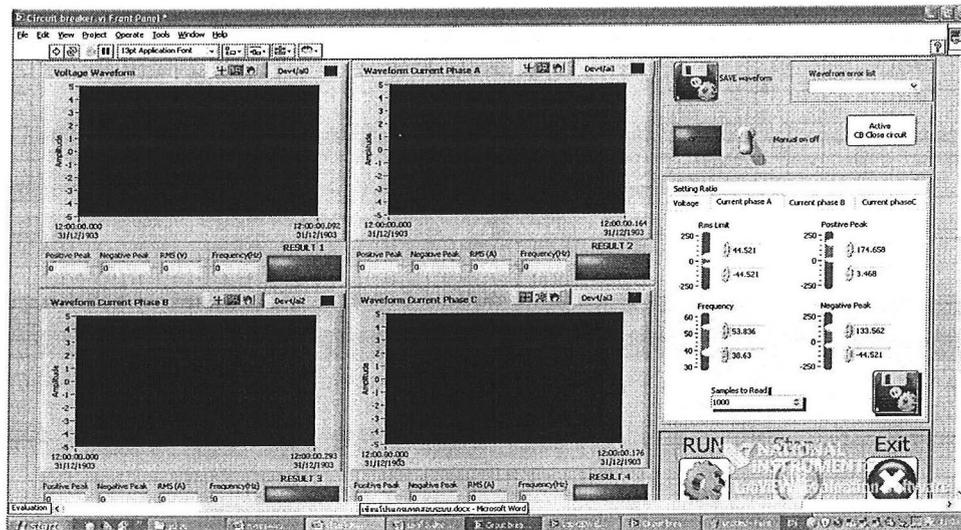
ข. โมดูลแอนะล็อกเอาต์พุต NI 9264 16 ช่องสัญญาณ



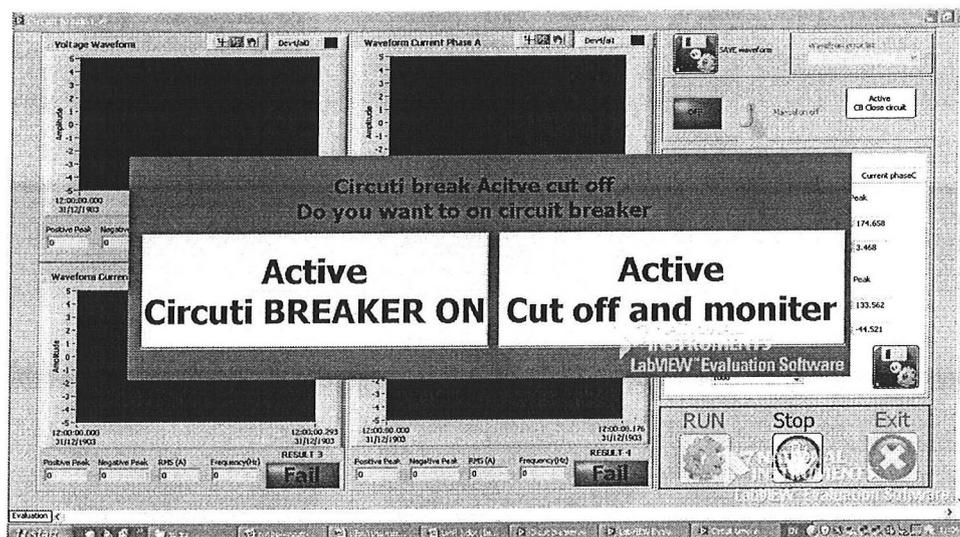
รูปที่ 3.28 โมดูลแอนะล็อกอินพุต NI 9201 และ โมดูลแอนะล็อกเอาต์พุต NI 9264



ค. การออกแบบหน้าจอแสดงผลแรงดันกระแส รูปที่ 3.29 หน้าจอแสดง ออกแบบให้มีหน้าสโคป 4 จอ ประกอบด้วย Waveform แรงดัน 1 ช่อง Waveform กระแส 3 ช่อง สามารถกำหนดขอบเขต แรงดัน และกระแสของระบบที่นำไปใช้ แสดงสถานะทำงานของ SSCB และหยุดทำงาน บันทึกผลในกรณีที่เกิดความผิดปกติขึ้นในระบบ รูปที่ แสดงกรณีที่ SSCB ตัดวงจรออกจากระบบ สามารถสั่งการให้ SSCB ต่อโดยทันที หรือเก็บค่าการเกิดความผิดปกติของระบบ



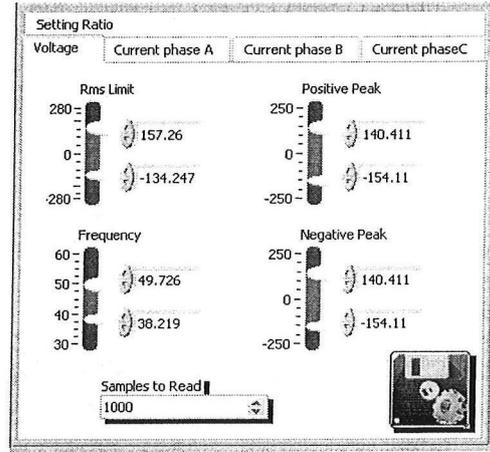
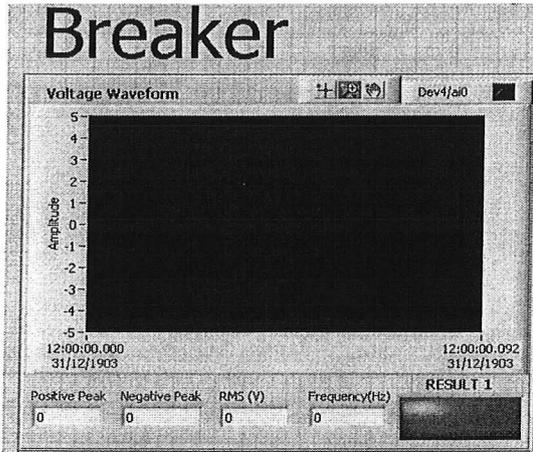
รูปที่ 3.29 ออกแบบหน้าจอแสดงผลสถานะต่อวงจรปกติ



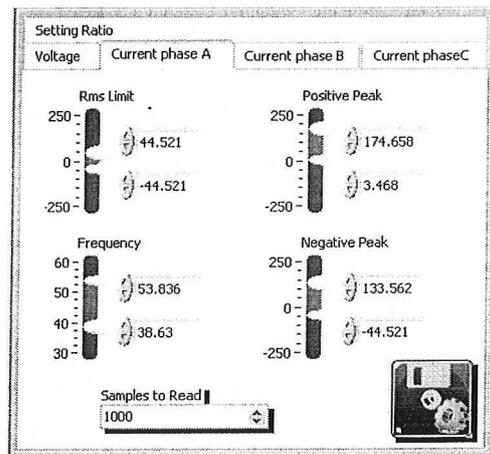
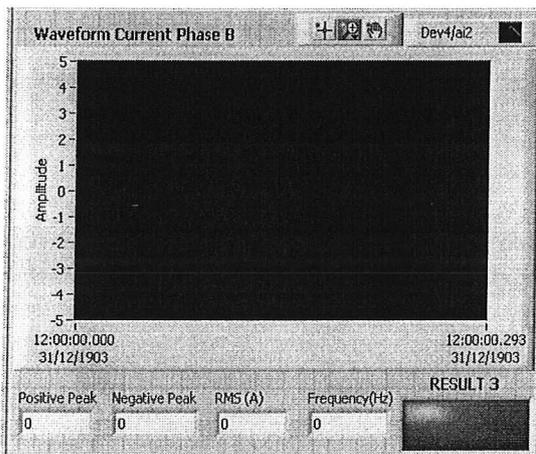
รูปที่ 3.30 ออกแบบหน้าจอแสดงผลสถานะตัดวงจรปกติ



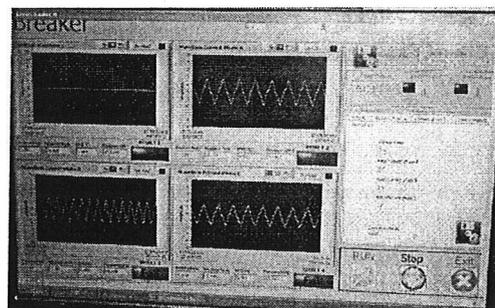
ง. กำหนดขอบเขตแรงดันและกระแสของระบบ



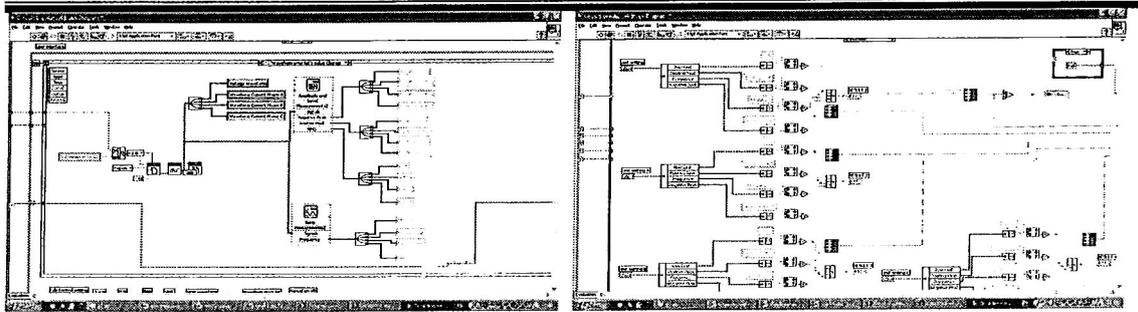
รูปที่ 3.31 โปรแกรม Lab View ในการตรวจจับค่าแรงดันไฟฟ้าในระบบแบบ RMS



รูปที่ 3.32 โปรแกรม Lab View ในการตรวจจับค่ากระแสไฟฟ้าในระบบแบบ RMS



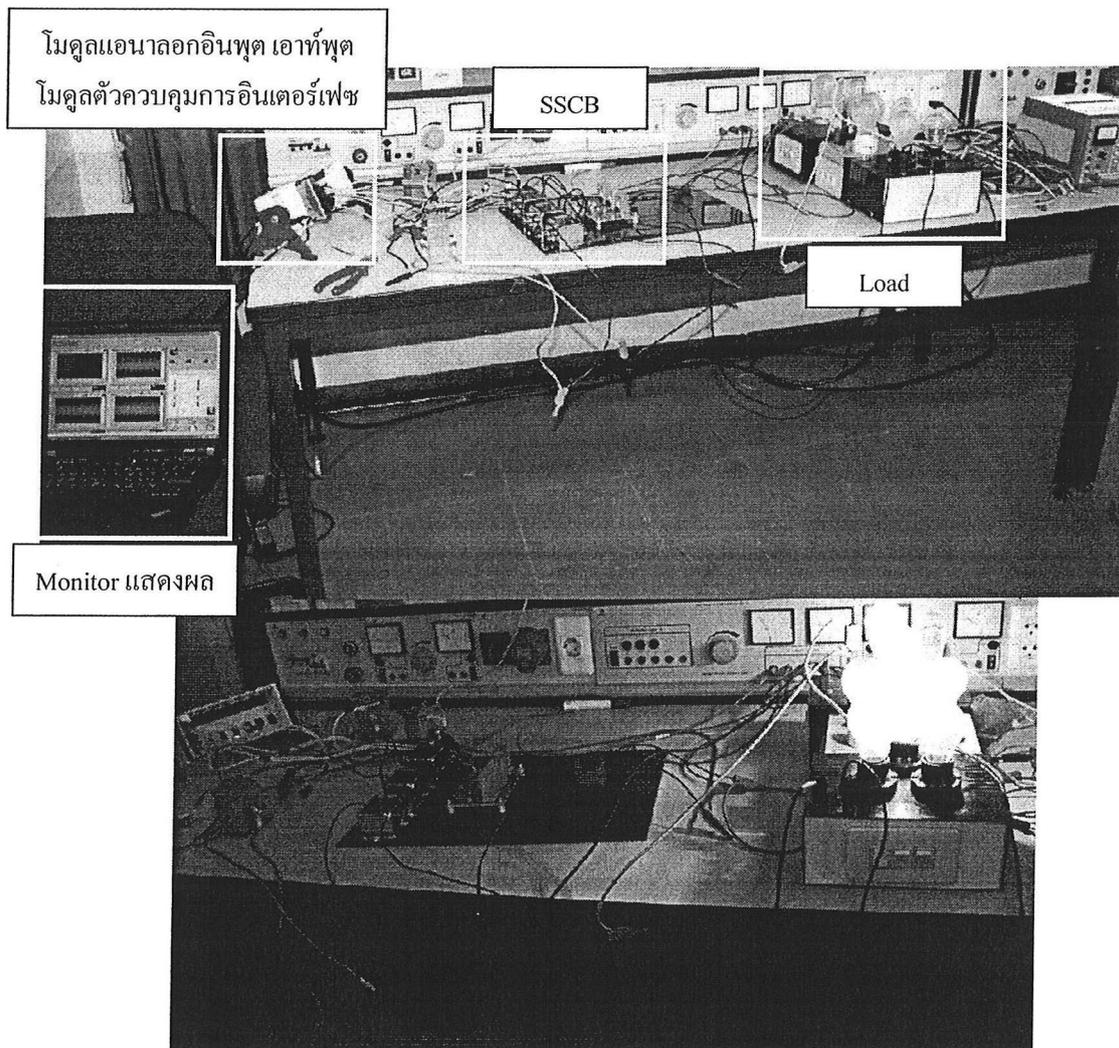
รูปที่ 3.33 ทดสอบรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าในสภาวะปิดวงจรด้วยโปรแกรมLab View



รูปที่ 3.34 ตัวอย่าง Control Block ของ โปรแกรม

### 3.3.8 ทดสอบชุดตัด ต่ອງจร ร่วมกับชุดตรวจจับความผิดปกติของระบบ

เมื่อสร้างทั้ง 2 ส่วนเสร็จ จึงนำระบบมาซึ่งต่อกันเพื่อทำการทดสอบอุปกรณ์ เมื่อต่อกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส ต่อโหลดหลอดไฟ



รูปที่ 3.35 เชื่อมต่อSSCB เข้ากับระบบไฟฟ้า และทดสอบการทำงาน



### 3.5 สรุปท้ายบท

ในบทนี้แสดงให้เห็นถึงวิธีการออกแบบ สร้าง แสดงถึงวิธีการตรวจจับความผิดปกติในระบบไฟฟ้าและส่งสัญญาณ ไปจุดชนวนที่ขาเกิดของเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบโซลิตสเตท และออกแบบเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบโซลิตสเตท ทดสอบการตัด-ต่อวงจรไฟฟ้าเมื่อระบบเกิดความผิดปกติขึ้นที่โหลด R L ศึกษาพฤติกรรมรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และการสวิตซ์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ โดยจำลองค่าพารามิเตอร์ และแบบจำลองชุดควบคุมในระบบเมื่อเกิดสถานะความผิดปกติ โดยการวิเคราะห์ค่าของอุปกรณ์จาก Data sheet และวิเคราะห์สถานะการตัดต่อระบบ ความเร็วในการ นำกระแส และ หยุดนำกระแสของไอจีบีที สร้าง SSCB ตามวงจรที่ได้ ออกแบบ และออกแบบชุดตรวจจับความผิดปกติด้วยโปรแกรม Lab VIEW และทดสอบเข้ากับระบบไฟฟ้า 3 เฟส แสดงผลทดสอบในบทที่ 4 ต่อไป