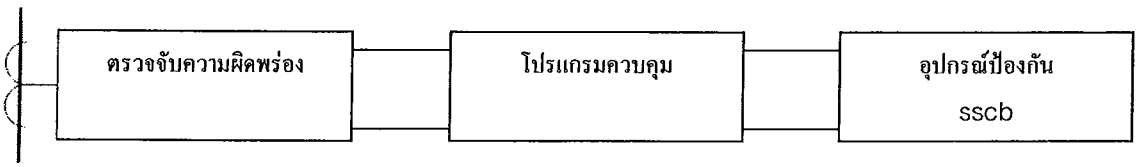
บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากแนวคิดสร้างSSCB เพื่อใช้สำหรับการตัดต่อวงจรไฟฟ้าเมื่อเกิดความผิดพร่อง ของระบบไฟฟ้าในสาวะ แรงดันตก แรงดันเกิน กระแสเกิน และกระแสลัดวงจร ส่วนที่ต้องศึกษานั้นแยกออกเป็น 2 ส่วนคือส่วนการ ตัด ต่อวงจรของ SSCB และส่วนตรวจจับความผิดพร่องของระบบ ดังนั้นผู้จัดทำโครงการ ได้ศึกษาทฤษฎีการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์ ระยะเวลาการ ตัด ต่อวงจร และข้อเสียของการอาร์คที่หน้าสัมผัสของเซอร์กิตเบรกเกอร์ มาวิเคราะห์ข้อดี และข้อเสียของเซอร์กิตเบรกเกอร์ในปัจจุบัน และนำเทคโนโลยีของสารกึ่งตัวนำซึ่งในปัจจุบันมีการผลิตที่มีขนาดทนกระแสและแรงดันที่สูงมากขึ้น ทางผู้วิจัยจึงมีแนวคิดนำคุณสมบัติในข้อนี้มาใช้ประโยชน์กับระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำ การศึกษาชนิดของความผิดพร่อง คำนวณความรุนแรงของการลัดวงจรทางไฟฟ้ามาเป็นข้อมูลของกระแส และแรงดัน ขณะเกิดความผิดพร่อง เพื่อนำไปพิจารณาอุปกรณ์ป้องกันติดตั้งใช้งานที่เหมาะสมในการสร้าง SSCB

ภาพรวมของการทำงานของSSCB แบ่งออกเป็น 3 ส่วนสำคัญคือ

1. ส่วนของการตรวจจับความผิดพร่องของระบบ
2. โปรแกรมควบคุมเงื่อนไขการตรวจจับความผิดปกติของระบบ
3. ส่วนการทำงานของ SSCB



รูปที่ 2.1 การทำงานเบื้องต้นของSSCB

<u>งานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อศึกษาออกแบบSSCB</u>

ในการทำงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาบทความจากต่างประเทศที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย เนื่องจากในประเทศไทยยังไม่มีผู้นำเสนองานวิจัยเกี่ยวกับเรื่องนี้ จึงยากต่อการหาเอกสารอ้างอิงสำหรับการทำวิจัยในครั้งนี้ สำหรับเอกสารที่ได้ศึกษามา สรุปได้พอสังเขปดังนี้

[1] บทความนี้เป็นการนำเสนอการทดสอบเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันต่ำ เมื่อเกิดการอาร์คที่หน้าสัมผัสของเซอร์กิตเบรกเกอร์และการเกิดประกายไฟ ตามมาตรฐาน IEEE 1584 โดยทำการ

ทดสอบเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันต่ำของหลายๆบริษัทผู้ผลิต ซึ่งผลของการทดสอบ การเกิดการอาร์คที่หน้าสัมผัสของเซอร์กิตเบรกเกอร์หลายครั้งส่งผลให้ตัวโครงสร้างของอุปกรณ์ และหน้าสัมผัสของเซอร์กิตเบรกเกอร์ได้รับความเสียหายเพิ่มขึ้นในทุกๆครั้งที่เกิดการอาร์ค

[2] บทความนี้เป็นการนำเสนอ และจำลองถึงผลกระทบของแรงดันเมื่อในระบบเกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นในกรณีต่างๆ ตามช่วงเวลาของการเกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน มีการให้คำจำกัดความของการเกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันแต่ละเหตุการณ์ เพื่อให้มีความเข้าใจต่อเหตุการณ์ และใช้ศัพท์คำจำกัดความเป็นในแนวทางเดียวกันตามมาตรฐานของ IEEE 1159-1995, 1995

[3] บทความนี้เป็นการนำเสนอการวิเคราะห์การเกิดการลัดวงจรในระบบไฟฟ้าโดยที่มีการต่อเซอร์กิตเบรกเกอร์เพื่อใช้งานในระบบโดยมีค่าหน่วงเวลาในการตัดวงจรออกจากระบบช่วงเวลาดังกล่าวส่งผลให้เกิดแรงดันตกขึ้น ซึ่งส่งผลยังโหลดที่ไวต่อการตอบสนอง และคอมพิวเตอร์ ดังนั้น จึงนำสารกึ่งตัวนำมาใช้วิเคราะห์การตัด-ต่อ มีความไวสูงมาก ในการวิเคราะห์โดยการนำสารกึ่งตัวนำที่มีความแตกต่างกันมาทำการวิเคราะห์การสวิตซ์ในช่วงเวลาสั้นๆ เพื่อเปรียบเทียบการตัด-ต่อ บนพื้นฐานของคุณลักษณะของสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิด เพื่อนำไปใช้ในงานจริงต่อไป

[4] บทความนี้เป็นการนำเสนอการเปรียบเทียบการตรวจจับแรงดันตกชั่วครู่ไม่สมมาตรเพื่อ ปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้า เมื่อระบบไฟฟ้าเกิดความผิดพร่องเปรียบเทียบการตรวจจับแรงดันไฟฟ้าขนาด ความถี่ และมุมของแรงดันไฟฟ้า มีวิธีการตรวจจับแรงดันทั้ง 4 วิธี คือ วิธีการ RMS, FFT, Peak Sequence Analysis, DQ method ตามเงื่อนไขทางด้านคุณภาพกำลังไฟฟ้า ตามมาตราฐาน IEEE1159-1995, การตรวจจับแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส ขณะเกิดความผิดพร่องในระบบแบบหนึ่งเฟสลงกราวน์ ที่เวลา 0.1 วินาที 4 วิธี จากผลการทดสอบพบว่า เวลาของการตรวจจับแบบ RMS ที่ต่ำกว่า 0.9 p.u. มีค่าเท่ากับ 0.1043 วินาที เวลาของการตรวจจับแบบ FFT ที่ต่ำกว่า 0.9 p.u. มีค่าเท่ากับ 0.1039 วินาที เวลาของการตรวจจับแบบ Peak Sequence Analysis (PSA) ที่ต่ำกว่า 0.9 p.u. ที่เวลา 0.1062 วินาที และเวลาของการ ตรวจจับแบบ dq ที่ต่ำกว่า 0.9 p.u. มีค่าเท่ากับ 0.1014 วินาที

[5] บทความนี้เป็นการนำเสนอความแตกต่างของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ 3 ชนิดคือ IGBT, GCT, GTO มีพฤติกรรมการทำงานคล้ายกัน แต่แตกต่างกันที่ลักษณะของโครงสร้างภายใน และอัตราการทนแรงดันสูงสุด มีค่าความสูญเสียขณะนำกระแสของอุปกรณ์ทั้ง 3 ชนิดเมื่อเทียบกันไอจีบีที มีค่าการสูญเสียขณะนำกระแสสูงที่สุด แต่เมื่อเปรียบเทียบทางด้านราคาของอุปกรณ์ไอจีบีที มี

ราคาต่ำกว่า ดังนั้นการเลือกใช้อุปกรณ์สำหรับสร้างโซลิดสเตทเซอร์กิตเบรกเกอร์จึงต้องคำนึงถึงการนำไปใช้กับระดับแรงดันไฟฟ้า และที่สำคัญที่สุดคือค่าใช้จ่ายในการสร้างอุปกรณ์ป้องกัน

<u>สรุปผลการศึกษาทฤษฎีหรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</u>

เซอร์กิตเบรกเกอร์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้กลไกเคลื่อนทางแมคคานิกส์ในการตัด - ต่อวงจรไฟฟ้า ให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านในเวลาที่กำหนด ตัดกระแสในขณะที่เกิดความผิดปกติในระบบไฟฟ้า เช่น เกิดลัดวงจร โหลดเกิน ฉะนั้นจึงกำหนดหน้าที่ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ ในขณะระบบมีการลัดวงจรเกิดขึ้นเป็นหน้าที่หลัก ถึงแม้ว่าในการใช้งานจริงเซอร์กิตเบรกเกอร์ จะทำหน้าที่หลักน้อยครั้ง แต่ต้องมีการทดสอบเพื่อยืนยันความสามารถของเซอร์กิตเบรกเกอร์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและคุณภาพของระบบไฟฟ้า การเกิดการอาร์คที่หน้าสัมผัสก็เป็นส่วนสำคัญที่เกิดขึ้น เมื่อต้องตัดวงจรไฟฟ้าออกเพื่อป้องกันระบบไฟฟ้า การตรวจจับเมื่อเกิดความผิดพร่องในระบบในงานวิจัยนี้เลือกใช้การตรวจจับด้วยวิธี RMS เมื่อเกิดแรงดันตกต่ำกว่า 0.9 p.u. ให้ส่งสัญญาณไปจุดฉนวนที่ขาเกตของไอจีบีที เพื่อให้ หยุดนำกระแสไฟฟ้า เนื่องจากเป็นวิธีการตรวจจับที่ง่ายกว่าวิธีอื่นๆ จากที่ได้ศึกษามาทั้งหมด 4 วิธี ซึ่งข้อด้อยกว่าวิธีอื่น คือระยะเวลาในการตรวจจับความผิดพร่องมากกว่าวิธีอื่น แต่จากการศึกษาการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์ ระยะเวลาของการตรวจจับแบบ RMS ถือว่ามีความเร็วมากแล้ว

จากการศึกษาวรรณกรรมหรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้องถึงคุณภาพของแรงดันไฟฟ้า พบว่าแรงดันในระบบไฟฟ้า มีการเปลี่ยนแปลงได้หลายรูปแบบขึ้นอยู่กับชนิดของความรุนแรงของการเกิดความผิดพร่องขึ้น สำหรับงานวิจัยนี้เรามุ่งประเด็นแก้ปัญหาการเกิดการอาร์คที่หน้าสัมผัสของเซอร์กิตเบรกเกอร์ จากเกิดความผิดพร่องในระบบไฟฟ้าโดยศึกษาการนำคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำมาใช้ในสภาวะนำกระแส และหยุดนำกระแส

2.1 มาตรฐานการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน

มาตรฐานคุณภาพไฟฟ้า เป็นตัวกำหนดถึงการเปลี่ยนแปลงของแรงดันตามลักษณะต่างๆ ในแต่ละการเกิดความผิดพร่องขึ้นในระบบไฟฟ้า เช่น การเกิดแรงดันตก แรงดันเกิน แรงดันสมมาตรและไม่สมมาตร เป็นต้น แก้ปัญหาเพื่อการปรับปรุงให้คุณภาพไฟฟ้าดีขึ้น สำหรับในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้มาตรฐานการเปลี่ยนแปลงแรงดัน ของ IEEE 1159-1995 [6] เพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการวิเคราะห์สภาวะความผิดพร่องในระบบ

การเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าประสิทธิผล (Vrms) แบ่งการเกิดการเปลี่ยนแปลงออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงการเปลี่ยนแปลงระยะสั้น และระยะยาว [6]

ช่วงระยะสั้น (Short Duration Voltage Variations) คือการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้า ที่มีระยะเวลาไม่เกิน 1นาที แบ่งออกได้เป็น 3 ลักษณะตามพฤติกรรมการเกิดเหตุการณ์ของระบบไฟฟ้า คือแรงดันไฟฟ้าตก (Voltage Sag or Voltage Dip) แรงดันไฟฟ้าเกิน (Voltage Swell or Voltage Surge) และไฟฟ้าดับ (Voltage Interruption) ซึ่งการเกิดทั้ง 3 ลักษณะนั้นแบ่งช่วงระยะเวลาของการเกิดเหตุการณ์ต่างๆได้ 3 ช่วงเวลาด้วยกันดังนี้ คือ แบบทันทีทันใด (Instantaneous) แบบชั่วขณะ (Momentary) และแบบชั่วครู่ (Temporary)

ช่วงระยะยาว (Long Duration Voltage Variations) คือการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าประสิทธิผล สาเหตุเกิดจากการเปลี่ยนแปลงการทำงานของโหลดขนาดใหญ่ โดยมีระยะเวลามากกว่า 1 นาที แบ่งออกได้เป็น 3 เหตุการณ์ด้วยกัน ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงระยะเวลายาว

ช่วงระยะเวลายาว (Long Duration)	ช่วงระยะเวลาการเกิด (Typical duration)	ขนาดแรงดัน (Voltage magnitude)
Interruption, Sustained	>1 min	0.0 p.u.
Under Voltage	>1 min	0.8-0.9 p.u.
Over Voltage	>1 min	1.1-1.2 p.u.

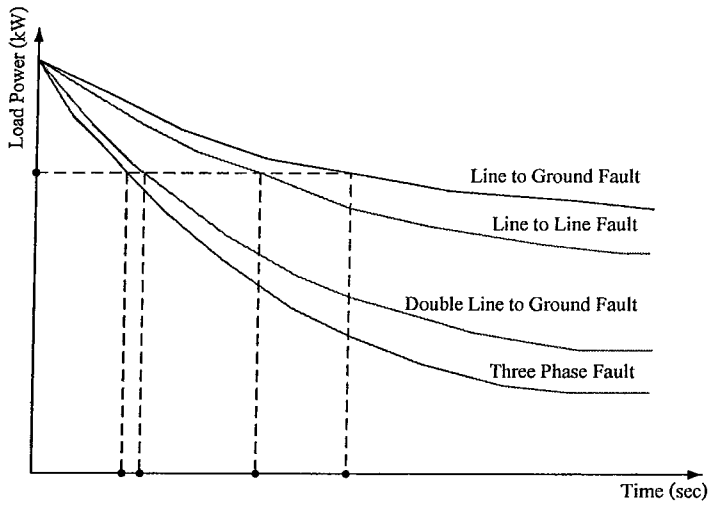
2.2 สภาวะการเกิดความผิดพร่องของระบบไฟฟ้า

จุดประสงค์ในการวิเคราะห์ความผิดพร่อง เพื่อเป็นพื้นฐานในการคำนวณ หากระแสลัดวงจร และการวิเคราะห์ความผิดพร่องใช้ในการพิจารณาความเหมาะสมของอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง เช่น เซอร์กิตเบรกเกอร์ รีเลย์ ฟิวส์ การคำนวณความรุนแรงความผิดพร่อง หรือขนาดของการลัดวงจรทางไฟฟ้าเพื่อให้ได้ข้อมูลของแรงดัน กระแสไฟฟ้า ขณะเกิดความผิดพร่อง และนำไปพิจารณาอุปกรณ์ป้องกันที่ติดตั้งใช้งานที่เหมาะสม [7]

การศึกษาสภาวะผิดพร่องของระบบไฟฟ้าที่เรียกว่า ความผิดพร่อง (Fault) แบ่งเป็น 2 ชนิด คือ

1. ความผิดพร่องแบบสมมาตร (Symmetrical Faults) คือ ความผิดพร่อง 3 เฟส (Three Phase Fault)

2. ความผิดพร่องแบบไม่สมมาตร (Unsymmetrical Fault) คือ ความผิดพร่องเฟสเดียวลงดิน (Line to Ground Fault), ความผิดพร่อง 2 เฟส (Line to Line Fault), และความผิดพร่อง 2 เฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault)

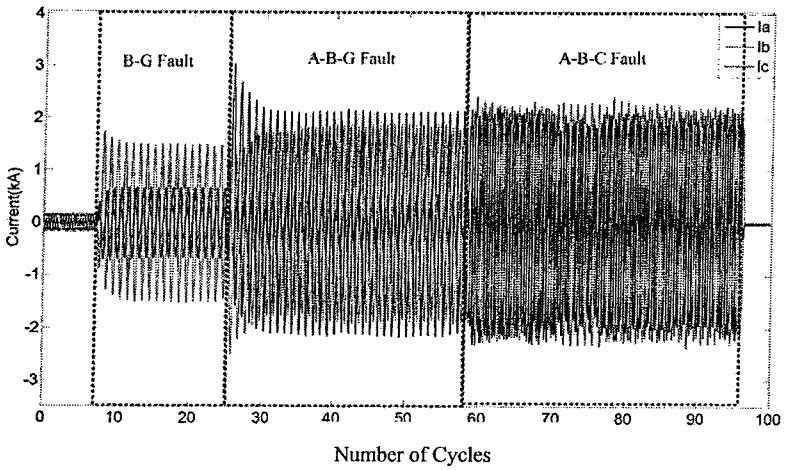


รูปที่ 2.2 ความเสถียรภาพของระบบเมื่อเกิดความผิดพร่องแต่ละชนิด

การเกิดความผิดพร่องแต่ละแบบทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าภาระไฟฟ้าของระบบ (System Loading) ไม่เท่ากัน ตามรูปที่ 2.2 เห็นว่าการเกิด Three Phase Fault จะทำให้เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าลดลงมากกว่าการเกิด Single Phase to Ground Fault ดังนั้นเวลาในการทำงานของอุปกรณ์ป้องกัน จำเป็นต้องสั่งตัดวงจรด้วยความเร็วที่สูงกว่า

2.3 การวิเคราะห์ชนิดของความผิดพร่องและความรุนแรงความผิดพร่องในระบบไฟฟ้า (Fault Analysis)

การคำนวณความรุนแรง หรือขนาดของการลัดวงจรทางไฟฟ้าเพื่อให้ได้ข้อมูลของกระแสและแรงดัน ขณะเกิดความผิดพร่อง เพื่อนำไปพิจารณาอุปกรณ์ป้องกันที่ติดตั้งใช้งานที่เหมาะสมในการเลือกเซอร์กิตเบรกเกอร์ต้องมี Rated Capacity ที่เหมาะสมสามารถทนสภาพการเกิดความผิดพร่อง ทั้งกระแส และ แรงดันในช่วงเวลาหนึ่ง เช่น 1 - 3 วินาที จนกว่าความผิดพร่องจะถูกเคลียร์ออกไปโดยไม่ทำให้เกิดความเสียหายทั้งจากความร้อนและทางกล (Overheating/Mechanical Damage) [8]



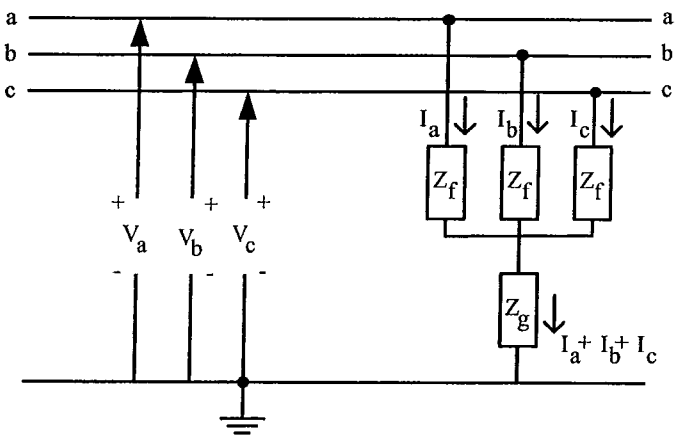
รูปที่ 2.3 ตัวอย่างกระแส 3 เฟส ในขณะเกิดความผิดพร่องในระบบไฟฟ้าที่มีการพัฒนาเปลี่ยนประเภท [9]

2.3.1 การวิเคราะห์กระแสลัดวงจรของความผิดพร่องแต่ละชนิด

การเกิดสภาวะกระแสลัดวงจร เป็นสภาวะที่อุปกรณ์ป้องกันต้องตัดระบบที่ผิดพร่องออกอย่างรวดเร็ว [10]

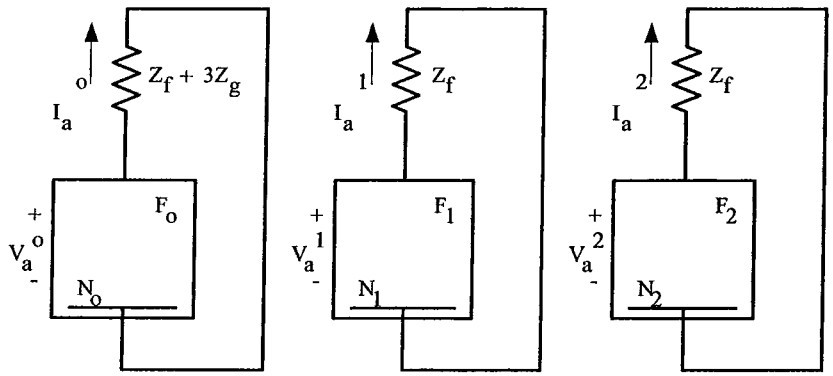
1. ความผิดพร่อง 3 เฟส

การลัดวงจรแบบสามเฟสในระบบจำหน่ายเป็นไปได้ยากมาก มีโอกาสเกิดขึ้นน้อยมาก แต่ถ้าเกิดขึ้นจะมีค่ากระแสลัดวงจรที่รุนแรงมากกว่าการเกิดความผิดพร่องวิธีอื่น ดังแสดงในรูป 2.4



รูปที่ 2.4 การเกิดความผิดพร่องแบบ 3 เฟส

จากรูปที่ 2.5 แสดงการเชื่อมโยงของวงจรลำดับบวก ลบ และศูนย์



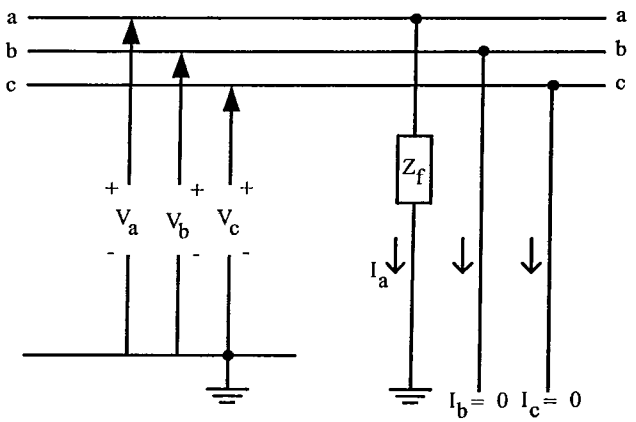
รูปที่ 2.5 วงจรลำดับการเกิดความผิดพร่องแบบ 3 เฟส

สมการกระแสของความผิดพร่องแบบ 3 เฟส

$$I_a = \frac{V_f}{Z_1 + Z_f} \tag{2.1}$$

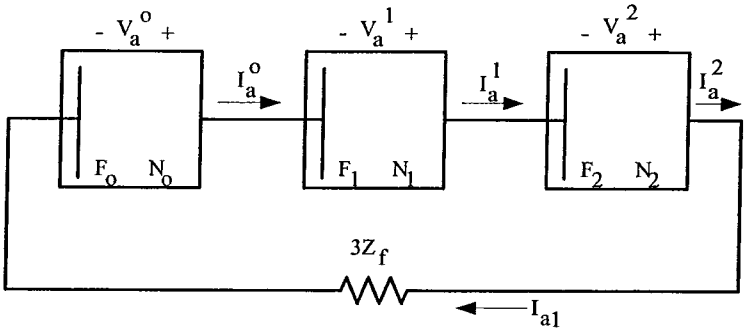
2. ความผิดพร่องเฟสเดียวลงดิน (Line to Ground Fault)

การเกิดความผิดพร่องเฟสเดียวลงดิน เป็นการลัดวงจรที่เกิดขึ้นง่ายที่สุด อาจเกิดจากแฟลชข้ามลูกถ้วย จากฟ้าผ่า หรือ สายตัวนำสัมผัสกับโครงสร้างบนดิน ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การเกิดความผิดพร่องเฟสเดียวลงดิน

ค่ากระแสลำดับบวก ลำดับลบ และลำดับศูนย์ ของเฟส a มีค่าเท่ากันแสดงว่าอิมพีแดนซ์ลำดับบวก ลำดับลบ และลำดับศูนย์ ต่ออนุกรมกันและผลของแรงดันที่เฟส a มีค่าเท่ากับองค์ประกอบสมมาตรลำดับแรงดัน สามารถเขียนการเชื่อมโยงของวงจรลำดับบวก ลบ ศูนย์ ดังรูป 2.7



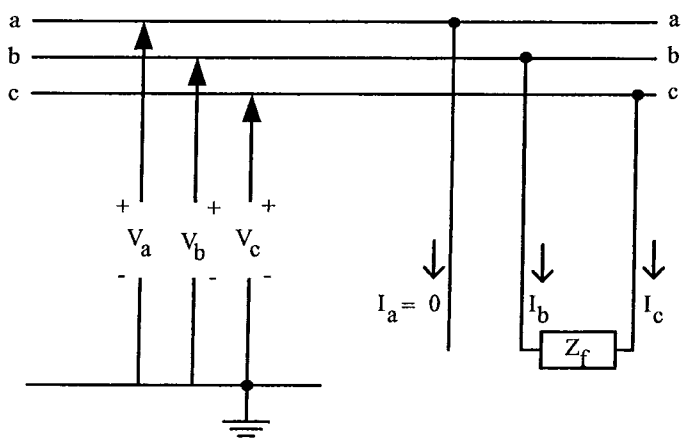
รูปที่ 2.7 วงจรลำดับการลัดวงจรแบบเฟสเดียวลงดิน

หาค่ากระแสลัดวงจรแบบเฟสเดียวลงดิน

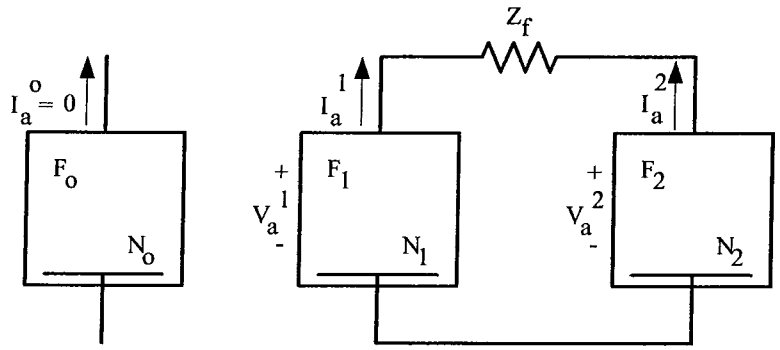
$$I_a^0 = I_a^1 = I_a^2 = \frac{V_f}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + 3z_f} \qquad (2.2)$$

3. ความผิดพร่อง 2 เฟส (Line to Line Fault)

การลัดวงจรระหว่างเฟส สมมุติเกิดระหว่างเฟส b กับเฟส c ผ่านอิมพีแดนซ์ที่เฟส b และเฟส c ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การลัดวงจรระหว่างเฟส



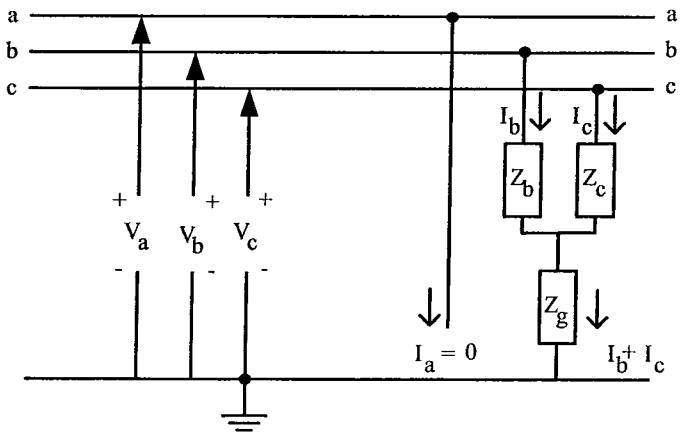
รูปที่ 2.9 ลำดับของการเกิดความผิดพร่อง 2 เฟส

หาค่ากระแสลัดวงจรแบบความผิดพร่อง 2 เฟส

$$I_a^1 = \frac{V_f}{Z_1 + Z_2 + Z_f} \tag{2.3}$$

4. ความผิดพร่อง 2 เฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault)

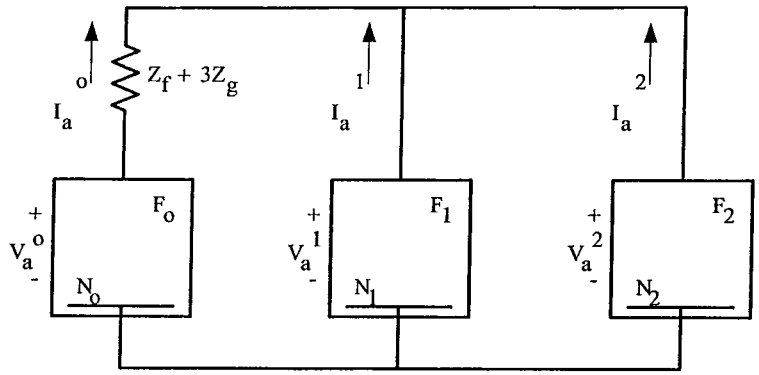
การลัดวงจรแบบระหว่างเฟส b กับเฟส c ผ่านอิมพีแดนซ์ลงดิน ดังรูป 2.10



รูปที่ 2.10 ความผิดพร่อง 2 เฟสลงดิน

สามารถเขียนการเชื่อมโยงของวงจรลำดับบวก ลบ ศูนย์ ได้ดังรูป 2.11

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุดงานวิจัย
วันที่ 31 มี.ค. 2554
เลขทะเบียน 237112
เลขเรียกหนังสือ



รูปที่ 2.11 วงจรลำดับการเกิดความผิดพร่อง 2 เฟสลงดิน

ค่ากระแสลัดวงจร

$$I_a^1 = \frac{V_f}{Z_1 + \dfrac{Z_2 \times (Z_0 + 3Z_f)}{Z_2 + Z_0 + 3Z_f}} \tag{2.4}$$

หากระแสในแต่ละเฟส

$$I_{abc} = AI_a^{012} \tag{2.5}$$

2.4 เซอร์กิตเบรกเกอร์ (Circuit Breaker : CB)

การศึกษาข้อมูลเบื้องต้นของเซอร์กิตเบรกเกอร์เพื่อนำมาใช้ในระบบไฟฟ้า เนื่องจากในระบบไฟฟ้าในทุกระบบนั้นไม่ได้เป็นระบบที่ทำงานดีที่สุด เพราะฉะนั้นหน้าที่หลักของเซอร์กิตเบรกเกอร์ คือ ป้องกันกระแสไฟฟ้าเกินที่เกิดขึ้นจากสภาวะโหลดเกิน หรือ สภาวะลัดวงจร ดังนั้นในระบบไฟฟ้าจึงต้องประกอบด้วยอุปกรณ์ป้องกันเพื่อให้ได้ระบบไฟฟ้าที่ดีที่สุด

1. การป้องกันกระแสลัดวงจร (Short Circuit Protection) ประกอบ 3 ปัจจัยหลัก ต่อการเปิดวงจร ขณะเกิดการลัดวงจร ของเซอร์กิตเบรกเกอร์

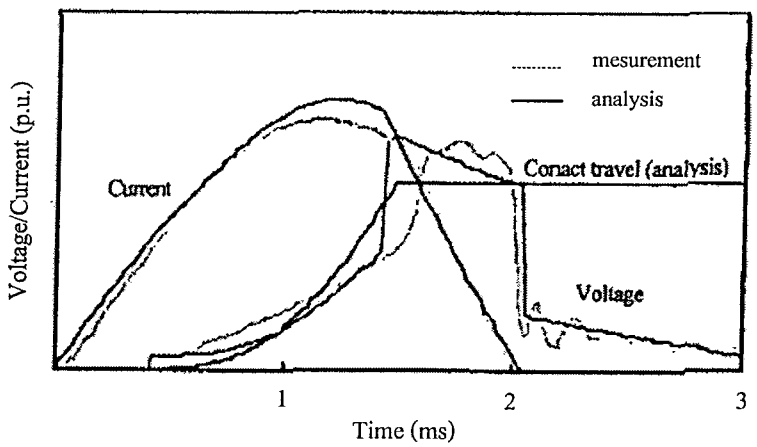
- ตรวจจับกระแสลัดวงจรได้เร็วที่สุด
- เปิดออกหน้าสัมผัสของเซอร์กิตเบรกเกอร์ได้เร็วที่สุด
- จำกัดปริมาณกระแสลัดวงจร

2. การป้องกันกระแสโหลด โหลดเกินป้องกันกระแสที่เกินเนื่องจากการใช้งานโหลดเกินพิกัด สามารถป้องกันปัญหาไฟขาดเฟส (Phase Loss) [11]

2.4.1 ประกายไฟที่เกิดจากการอาร์ค

1. การเกิดอาร์คของเซอร์กิตเบรกเกอร์ เวลาการเกิดอาร์ค และเวลารวมของการเคลียร์อาร์ค (Arc Duration and Total Clearing Time) การเกิดอาร์คมีสภาพเป็นตัวนำไฟฟ้า กระแสที่ไหลผ่านมีความสัมพันธ์กับแรงดันระหว่างปลายทั้งสองของหน้าสัมผัสของเซอร์กิตเบรกเกอร์ซึ่งเป็นโลหะและอยู่ในฉนวน เพราะจะไม่นำกระแสที่อุณหภูมิปกติ เพราะฉะนั้นในสภาพเปิดวงจรจึงไม่มีกระแสไหลผ่านและในขณะที่เซอร์กิตเบรกเกอร์อยู่ในสภาพปิดวงจรกระแสจะไหลผ่านหน้าสัมผัสของเซอร์กิตเบรกเกอร์ทางโลหะที่ต่อกันอยู่ เมื่อพิจารณาเฉพาะขณะที่มีกระแสไหลผ่านแล้วหน้าสัมผัสเริ่มเคลื่อนที่จากกันเมื่อได้รับคำสั่งให้เปิดส่งผลให้ค่าความต้านทานเพิ่มขึ้น และมีแรงดันตกคร่อมประมาณ 2-3 โวลต์ เมื่อหน้าสัมผัสเริ่มแยกออกจนมีระยะห่างเล็กน้อยเรียกว่าช่องว่างอากาศ แรงดันคร่อมช่องว่างอากาศ จะเพิ่มสูงขึ้นมาก เกิดสนามไฟฟ้าระหว่างช่องว่างอากาศ สูงจนอิเล็กตรอนสามารถหลุดออกจากหน้าสัมผัสวิ่งผ่านช่องว่างอากาศ ไปสู่อีกด้าน ช่วงนี้มีเวลาเป็นไมโครวินาที และเป็นจุดเริ่มต้นของอาร์ค

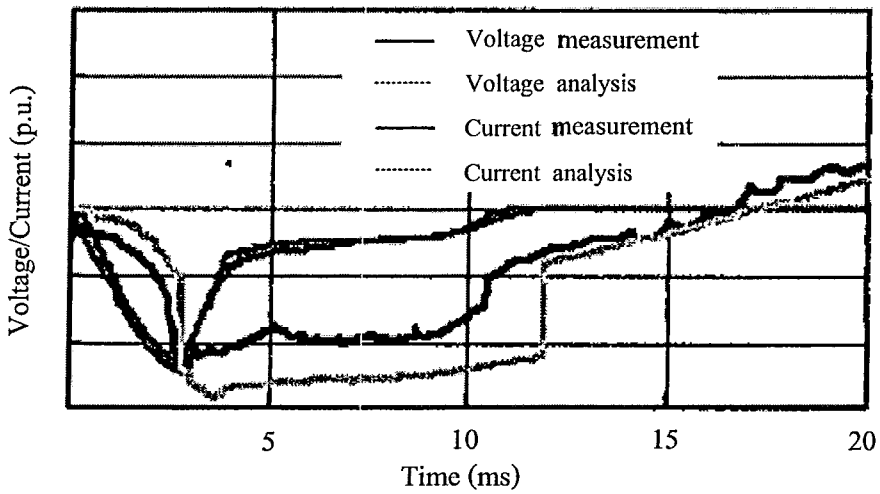
เวลาการเกิดอาร์ค และเวลารวมของการเคลียร์อาร์ค ขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของโลหะที่นำมาทำหน้าสัมผัสของเซอร์กิตเบรกเกอร์ ระยะห่างของการวางหน้าสัมผัส โดยกำหนดกราฟของเวลา -กระแส



รูปที่ 2.12 การอาร์คของเซอร์กิตเบรกเกอร์ 1 เฟส ทำงานด้วยอำนาจแม่เหล็กเปรียบเทียบระหว่างค่าจากการวัดและการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม3D-FEM SIMULINK [12]

จากรูป 2.12 เป็นการเปรียบเทียบการอาร์คที่หน้าสัมผัสของเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบทำงานด้วยอำนาจแม่เหล็กในระบบไฟฟ้า 1 เฟส ที่ได้จากการวัด และการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม 3D-FEM SIMULINK ภายใต้เงื่อนไข Ic = 50 kA (Interrupting Capacity : Ic เป็นพิกัดการทนกระแสลัดวงจร

สูงสุด) สปาร์คที่หน้าสัมผัสหลังจากเกิดการลัดวงจร 0.5 มิลลิวินาที เพื่อดูค่าของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นขณะเกิดการอาร์คที่หน้าสัมผัส

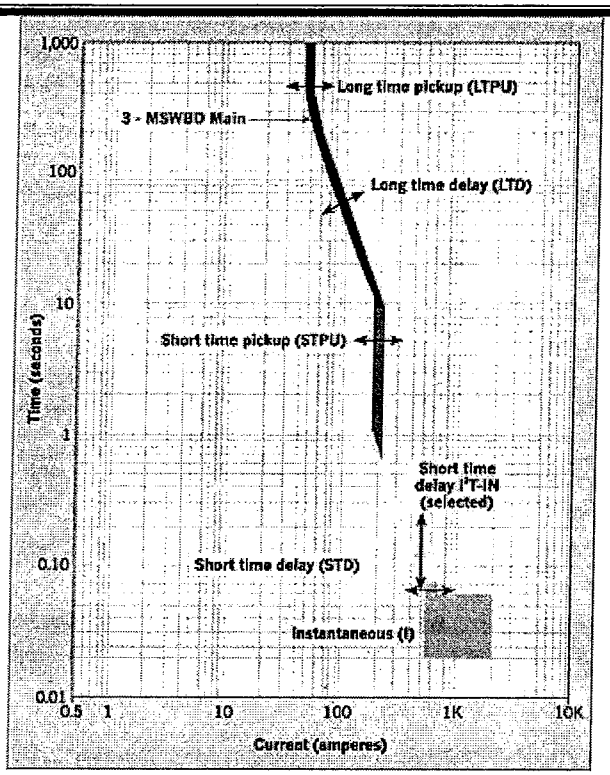


รูปที่ 2.13 การอาร์คของเซอร์กิตเบรกเกอร์ 3 เฟส ทำงานด้วยอำนาจแม่เหล็กเปรียบเทียบระหว่างค่าจากการวัดและการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม 3D-FEM SIMULINK [13]

จากรูป 2.13 เป็นการเปรียบเทียบการอาร์คที่หน้าสัมผัสของเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบทำงานด้วยอำนาจแม่เหล็กในระบบไฟฟ้า 3 เฟส ที่ได้จากการวัด และการวิเคราะห์ด้วย โปรแกรม 3D-FEM SIMULINK

2. ประกายไฟฟ้า (Arc Flash) เกิดขึ้นเมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านช่องว่างอากาศระหว่างตัวนำ ในการจัดลักษณะการใช้งานปกติตัวนำไฟฟ้าต่างเฟสกันต้องถูกจัดวางด้วยระยะห่างระหว่างกันอย่างปลอดภัย หากมีการสัมผัสตัวนำด้วยมือ หรือโพรบของเครื่องมือวัด จนเป็นสาเหตุให้เกิดการลัดวงจรระหว่างตัวนำไฟฟ้าขึ้น และเกิดเป็นประกายไฟฟ้าขึ้นมา

การเลือกใช้เซอร์กิตเบรกเกอร์ชนิดจำกัดกระแส ที่จะทำงานตัดวงจรในขอบเขตแบบทันทีทันใด และในขอบเขตจำกัดกระแส ช่วยลดระดับพลังงานการลัดวงจรลงได้ การเลือกใช้เซอร์กิตเบรกเกอร์ที่สามารถปรับตั้งค่าการทำงานแบบยาว แบบสั้น หรือแบบทันทีทันใดได้จะเป็นวิธีการที่ดีที่สุดในการควบคุมระดับพลังงานลัดวงจร ดังแสดงในรูปที่ 2.14 เป็นฟังก์ชันทริป (Trip) ที่สามารถปรับเปลี่ยนได้ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่มีชุดทริปด้วยโซลิดสเตท ทำให้แน่ใจได้ว่าเซอร์กิตเบรกเกอร์จะตัดวงจรได้อย่างรวดเร็ว ถ้าระดับของการลัดวงจรต่ำกว่าค่า Instantaneous Setting



รูปที่ 2.14 ฟังก์ชันการปรับการทริปของเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ใช้ชุดวงจรโซลิดสเตท [13]

2.4.2 กลไกการทริปของเซอร์กิตเบรกเกอร์

กลไกการทริปของเซอร์กิตเบรกเกอร์ออกแบบให้มีลักษณะของกลไกการทริปดังนี้

- กลไกการทริปทางแมคคานิกส์
- กลไกการทริปด้วยมือ
- กลไกการทริปจากการเกิดโหลดเกิน
- กลไกการทริปจากการลัดวงจร

รูปแบบของเซอร์กิตเบรกเกอร์ แบ่งตามลักษณะดังต่อไปนี้

1. หลักการทำงาน เซอร์กิตเบรกเกอร์ กลไกการทริป

- ทำงานด้วยความร้อน (Thermal Trip) คือ ใช้หลักการขยายตัวของโลหะสองชนิดที่ไม่เท่ากัน เมื่อกระแสไหลผ่านจะเกิดความร้อน โลหะสองแผ่นจะขยายตัวไม่เท่ากันและจะไปดันกลไกให้ปลดวงจร เวลาในการทำงานจะช้าหรือเร็วขึ้นอยู่กับกระแสที่ไหลผ่าน เป็นการทำงานแบบเวลาผกผันเหมาะสำหรับการทำงานในวงจรที่อาจเกิดโหลดเกินชั่วขณะ เช่น ในการเริ่มเดินมอเตอร์

- ทำงานด้วยอำนาจแม่เหล็ก (Magnetic Trip) คือ กระแสไหลผ่านขดลวดที่เป็นตัวสร้างสนามแม่เหล็ก ถึงค่าที่กำหนดแม่เหล็กจะดูดกลไกให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ทำงานปลดวงจร การทำงานแบบนี้เหมาะที่จะปลดวงจรเมื่อเกิดกระแสลัดวงจรเนื่องจากทำงานได้รวดเร็ว

- ทำงานด้วยวงจรอิเล็กทรอนิกส์หรือโซลิดสเตตเซอร์กิตเบรกเกอร์ มีวงจรอิเล็กทรอนิกส์สำหรับตรวจจับกระแสที่ทำงานให้ความแม่นยำสูง สามารถปรับค่าต่างๆ ได้ทั้งค่ากระแสและเวลา โดยเฉพาะเซอร์กิตเบรกเกอร์ขนาดใหญ่มักนำระบบนี้มาใช้ จะ ประกอบด้วยหม้อแปลงกระแสแต่ละเฟส เพื่อลดขนาดกระแสป้อนเข้าไปยังชุดทริปโซลิดสเตดโดยใช้ค่ากระแสที่วัดได้เปรียบเทียบกับค่ากระแส ที่กำหนดเมื่อสูงถึงค่าที่กำหนดชุดทริปโซลิดสเตตก็จะส่งสัญญาณไปทริปเซอร์กิตเบรเกอร์

2. พิกัดกระแสของเซอร์กิตเบรกเกอร์

- พิกัดกระแส Ampere Trip (AT) ซึ่งบอกให้รู้ว่าสามารถทนกระแสใช้งานในภาวะปกติได้สูงสุดเท่าใด พิกัดการทนกระแส ของเซอร์กิตเบรกเกอร์

- พิกัดกระแสโครง Ampere Frame (AF) หมายถึงพิกัดการทนกระแสสูงสุดของเซอร์กิตเบรกเกอร์ในแต่ละรุ่น Ampere Frame มีประโยชน์คือ สามารถเปลี่ยนพิกัด Ampere Trip ได้โดยที่ขนาด ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ยังเท่าเดิม

- พิกัดการทนกระแสลัดวงจรสูงสุด Interrupting Capacity (Ic) โดยปลอดภัยของเซอร์กิตเบรกเกอร์โดยปกติกำหนดค่าการทนกระแสเป็น kA ค่า Ic เพื่อจะบอกให้รู้ว่าเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่มีความปลอดภัยมากหรือน้อย

- พิกัดการทนกระแสลัดวงจรสูงสุดเซอร์กิตเบรกเกอร์ยังคงปลอดภัยอยู่ Rated Short-Circuit Breaking Capacity (Icu) ตามมาตรฐานจะบุเป็นค่า RMS ของไฟฟ้ากระแสสลับ ค่า Icn ปกติมีหน่วยเป็น kA RMS การทดสอบค่า Icu หรือ Icn ตามมาตรฐาน IEC มี 3 ลักษณะ

การทดสอบการทนกระแสลัดวงจร Operating Sequences (Open-Close/Open) โดยทำการปิดและเปิดวงจร ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ขณะมีกระแสลัดวงจร

การทดสอบการทนกระแสลัดวงจร Current and Voltage Phase Displacement ที่ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ ต่างๆ กัน พบว่าถ้าเพาเวอร์แฟคเตอร์ = 1 จะทำการปลดวงจรง่ายที่สุด และถ้า เพาเวอร์แฟคเตอร์มีค่าต่ำทำให้การปลดวงจรทำได้ยากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับความเป็นจริงที่ว่าระบบไฟฟ้าส่วนใหญ่เป็นแบบเพาเวอร์แฟคเตอร์ล้าหลังและยิ่งมีกระแสลัดวงจรสูงเท่าใด ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ก็ยิ่งต่ำลง

การทดสอบความเป็นฉนวนของโครง Dielectric Withstand Capability ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ หลังจากทอสอบการลัดวงจรไปแล้วว่ายังคงสภาพการเป็นฉนวนอยู่หรือไม่

- พิกัดการทนกระแสลัดวงจรสูงสุดที่เซอร์กิตเบรกเกอร์ Rated Making Capacity (Icm) สามารถทนได้ และทำการปลดวงจรแบบทันทีทันใดโดยไม่มีการหน่วงเวลาที่แรงดันพิกัด ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดในระบบไฟฟ้ากระแสสลับ โดยขึ้นอยู่กับค่า Icu ด้วยตัวคูณ K ซึ่งต่างกันไปตามค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ของกระแสลัดวงจร

- ประเภทของ Switchgear แรงต่ำ Rated short-time withstand current (Icw) แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ

ชนิด A คือระบบ Switchgear ที่ไม่มีความต้องการให้มีการหน่วงเวลาในการทำงานของอุปกรณ์ เป็นการปลดวงจรโดยอาศัยอำนาจแม่เหล็ก ได้แก่ โมเคสเซอร์กิตเบรกเกอร์ทั่วไป ดังนั้นจึงไม่มีค่า Icw

ชนิด B คือระบบ Switchgear ที่สามารถหน่วงเวลาในการปลดวงจรได้ ทั้งนี้เพื่อให้สามารถทำการปลดวงจรเป็นลำดับในระบบ โดยเซอร์กิตเบรกเกอร์ตัวที่อยู่ใกล้กระแสลัดวงจรที่สุดควรปลดวงจรก่อนตัวที่อยู่ถัดไป ซึ่งต้องทนกระแสลัดวงจรที่สูงกว่าและเป็นเวลาที่นานกว่าได้ โดยตัวมันเองไม่ปลดวงจรและไม่เสียหาย

- ค่าที่บอกว่าเซอร์กิตเบรกเกอร์ปลดวงจรหลังจากเกิดการลัดวงจรครั้งแรก Rated service short-circuit breaking capacity (Ics) เซอร์กิตเบรกเกอร์จะสามารถทนกระแสลัดวงจรในครั้งถัดไปได้เท่าเดิมหรือไม่ โดยเทียบกับค่า Icu โดยระบุเป็นเปอร์เซ็นต์ของค่า Icu เช่น 25 , 50 , 75 และ 100% เช่น เซอร์กิตเบรกเกอร์ถูกระบุค่า Ics = 0.5 Icu หมายความว่า เมื่อเซอร์กิตเบรกเกอร์ปลดวงจรหลังจากเกิดการลัดวงจรครั้งแรกแล้ว เซอร์กิตเบรกเกอร์จะสามารถทนกระแสลัดวงจร ในครั้งถัดไปได้เท่ากับ 50% ของ Icu

2.4.3 มาตรฐานเซอร์กิตเบรกเกอร์

เซอร์กิตเบรกเกอร์ของประเทศไทยที่ใช้กันได้ใช้มาตรฐาน IEC 60898 ซึ่งเซอร์กิตเบรกเกอร์ตามมาตรฐานนี้ ใช้สำหรับติดตั้งกับ บ้านที่อยู่อาศัยและอาคารทั่วไป ซึ่งตาม มาตรฐานการติดตั้งทางไฟฟ้าสำหรับประเทศไทย พ.ศ. 2545 เซอร์กิตเบรกเกอร์ MCB แบบ 2 ขั้ว (มาตรฐาน ว.ส.ท.) ได้กำหนดให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ใช้กับบ้านที่อยู่อาศัยที่มีขนาดกระแสไม่เกิน 125 แอมแปร์ ความทนกระแสลัดวงจรไม่เกิน 25 kA และต้องใช้เซอร์กิตเบรกเกอร์ ตามมาตรฐาน IEC 60898 เท่านั้นการตัดวงจรเมื่อเกิดไฟฟ้าลัดวงจร จากเส้น L ไปเส้น N หรือ ระหว่างเฟส ในระบบไฟฟ้า 3 เฟส โดยมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านมากๆ เมื่อเทียบกับกระแสใช้งานในภาวะปกติ เมื่อ เกิดไฟฟ้าลัดวงจร จะเกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเซอร์กิตเบรกเกอร์ในปริมาณมากๆ ถ้าปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านมีค่ามากกว่าค่ากระแสเกินทริปทันที (Overcorrect Instantaneous Tripping) ของ เซอร์กิตเบรกเกอร์ จะตัดวงจรทันทีภายในเวลา 0.1 วินาที มีค่าความทนกระแสไฟฟ้าลัดวงจรที่

กำหนด (Rated Short-Circuit Capacity หรือ Icn) เป็นค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรสูงสุดที่เซอร์กิตเบรกเกอร์ทนได้เมื่อเกิดกระแสลัดวงจร โดยทั่วไปตามข้อกำหนดเซอร์กิตเบรกเกอร์หลัก ต้องทนกระแสลัดวงจรได้ไม่น้อยกว่า 10 kA

อุณหภูมิใช้งานเซอร์กิตเบรกเกอร์อยู่ที่ -5°C - 40°C อุณหภูมิเฉลี่ย 24 ชั่วโมงไม่เกิน 35 °C

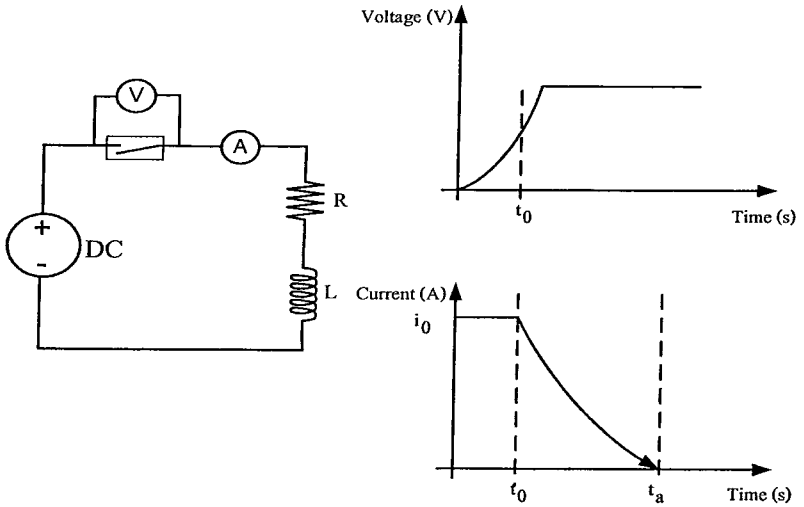
ตารางที่ 2.2 มาตรฐาน IEEE Std 242-2001 กำหนดค่าเคลีย์ความผิดพร่องของเซอร์กิตเบรกเกอร์

สภาวะการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์	ขนาดพิกัดกระแส 225–600 A (AT)
Instantaneous, cycles	2–3
Short time, cycles	10-30
Long time, cycles	Over 100
Ground fault, cycles	10–30

2.4.4 จำลองการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB / SIMULINK

การคำนวณกระแสคงที่ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ ในสภาวะ โหลดเกิน และกระแสลัดวงจร ในรูปของ แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง และแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ [15]

1. เซอร์กิตเบรกเกอร์ในแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง



รูปที่ 2.15 สภาวะของวงจรก่อนเปิดวงจรของเซอร์กิตเบรกเกอร์

สภาวะของวงจรก่อนเปิดวงจรของเซอร์กิตเบรกเกอร์

$$v = E \tag{2.6}$$

$$i_0 = \frac{E}{R} \tag{2.7}$$

สภาวะของวงจรหลังจากเปิดวงจรของเซอร์กิตเบรกเกอร์

$$E - Ri - L\frac{di}{dt} - v_a = 0 \tag{2.8}$$

2. เซอร์กิตเบรกเกอร์ในแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส

$$v = E\sin\omega t \tag{2.9}$$

$$i = I_0\cos(\omega t + \varphi) \tag{2.10}$$

เมื่อ

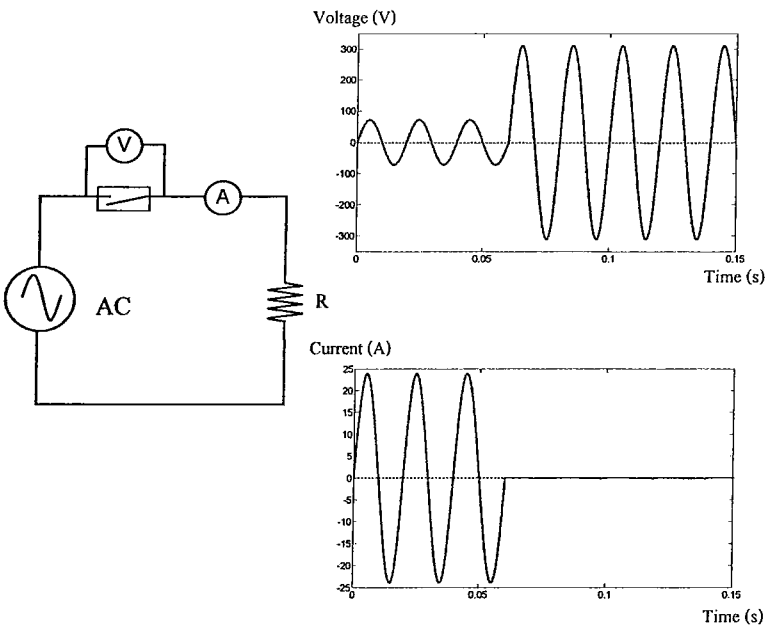
$$\cos\varphi = \frac{L\omega}{\sqrt{(L\omega)^2 + R^2}} \tag{2.11}$$

และ $$I_0 = \frac{E}{\sqrt{(L\omega)^2 + R^2}} \qquad (2.12)$$

จากการจำลองการตัดต่อวงจรไฟฟ้า 1 เฟส กำหนดค่าพารามิเตอร์ในการ SIMULATION ของเซอร์กิตเบรกเกอร์เบรกเกอร์ชนิดทำงานด้วยอำนาจแม่เหล็ก มีการกำหนดค่าที่ได้จากการคำนวณค่าความต้านทานที่ตกคร่อมหน้าสัมผัสของเซอร์กิตเบรกเกอร์ ในสภาวะที่เซอร์กิตเบรกเกอร์ต่อวงจร (สภาวะปกติปิด) เท่ากับ 2.103 โอห์ม และสภาวะที่ตัดวงจร (สภาวะปกติเปิด) อยู่ที่ 3.031 โอห์ม นำค่าที่ได้มาใช้ในการจำลอง [16]

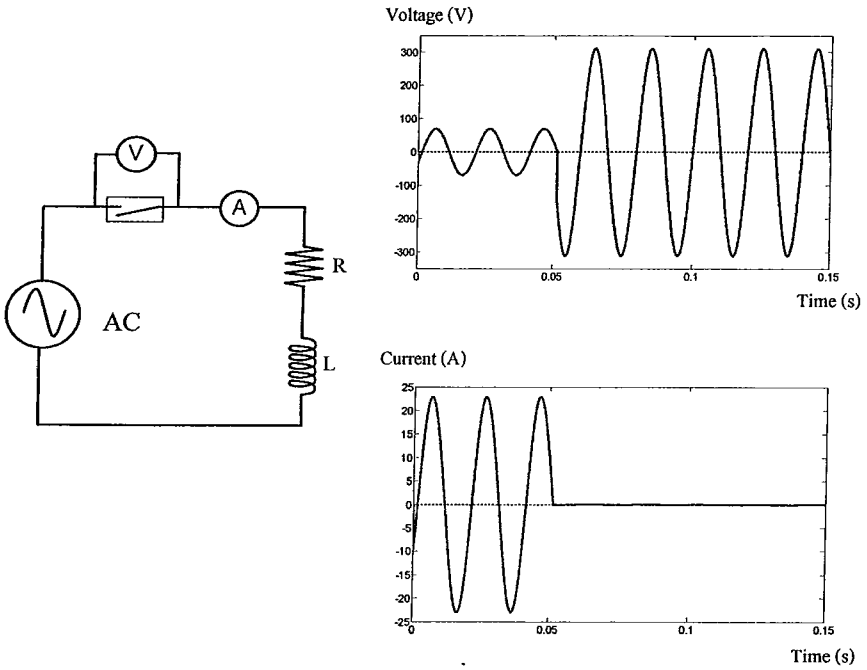
ตารางที่ 2.3 พารามิเตอร์ของวงจรที่ใช้ในการจำลอง

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



รูปที่ 2.16 การตัดวงจรของเซอร์กิตเบรกเกอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส โหลด R

จากรูปที่ 2.16 แสดงรูปคลื่นของแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้า ที่ตกคร่อมเซอร์กิตเบรกเกอร์ขณะตัดวงจรไฟฟ้าเมื่อเกิดความผิดพร่องที่เวลา 0.05 วินาที ใช้เวลาในการตัดวงจรไฟฟ้าโดยสมบูรณ์ที่เวลา 0.06 วินาที

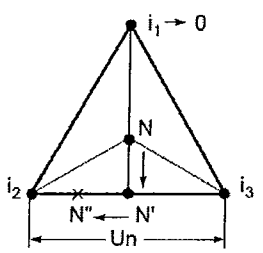


รูปที่ 2.17 การตัดวงจรของเซอร์กิตเบรกเกอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส โหลด RL

จากรูปที่ 2.17 แสดงรูปคลื่นของแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้า ที่ตกคร่อมเซอร์กิตเบรกเกอร์ขณะตัดวงจรไฟฟ้าเมื่อเกิดความผิดพร่องที่เวลา 0.05 วินาที ใช้เวลาในการตัดวงจรไฟฟ้าโดยสมบูรณ์ที่เวลา 0.055 วินาที

3. เซอร์กิตเบรกเกอร์ในแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส

มีการตัดวงจรไฟฟ้าในกรณีที่เกิดฟอล์ต แบบ ความผิดพร่องแบบสมมาตร และฟอล์ตแบบไม่สมมาตร กรณีของฟอล์ตแบบไม่สมมาตรที่เกิดขึ้นทำให้ขนาดและมุมของกระแส หรือแรงดันไม่ต่างเฟสกัน 120° แบ่งเป็น ฟอล์ตเฟสเดียวลงดิน ฟอล์ตแบบ 2 เฟสลงดิน ฟอล์ต 2 เฟส การเกิดฟอล์ต เป็นการทำให้จุดนิวตรอนเคลื่อนที่ ดังรูปที่ 2.18

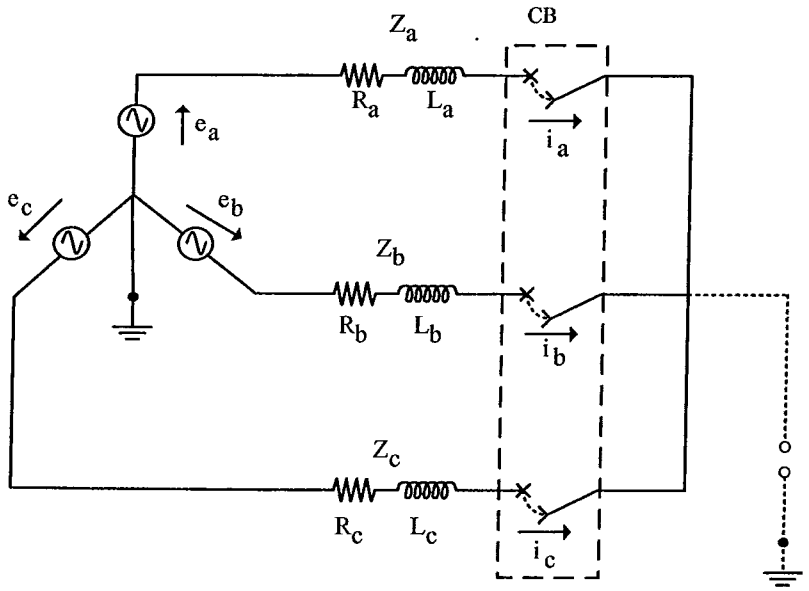


$i_1 = 0$

$i_2 = 0$

N' & N'' จุดนิวตรอนเคลื่อนที่

รูปที่ 2.18 การเคลื่อนที่ของจุดนิวตรอนในระบบไฟฟ้า 3 เฟส



รูปที่ 2.19 เซอร์กิตเบรกเกอร์ในแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส เมื่อเกิดความผิดพร่อง

สมการพื้นฐาน

$$e_a(t) - L_a\frac{di}{dt} - R_a i_a - v_a - v_0 = 0$$
$$e_b(t) - L_b\frac{di}{dt} - R_b i_b - v_b - v_0 = 0 \qquad (2.13)$$
$$e_c(t) - L_c\frac{di}{dt} - R_c i_c - v_c - v_0 = 0$$

เมื่อ e = แหล่งจ่ายไฟฟ้า

i = กระแสไฟฟ้า

v = แรงดันเมื่อเกิดการอาร์คของเซอร์กิตเบรกเกอร์

R = ความต้านทาน

L = ขดลวดเหนี่ยวนำ

จากความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้า 3 เฟส

$$e_a(t) = E_m\cos(\omega t + \theta)$$
$$e_b(t) = E_m\cos(\omega t + \theta - \frac{2}{3}\pi) \qquad (2.14)$$
$$e_c(t) = E_m\cos(\omega t + \theta + \frac{2}{3}\pi)$$

$$e_a(t) + e_b(t) + e_c(t) = 0 \tag{2.15}$$

$$i_a + i_b + i_c = 0 \tag{2.16}$$

จากสมการที่ (2.14) และ (2.15) แรงดันที่จุดนิวตรอน ดังรูปที่ 2.19

$$v_a + v_b + v_c + 3v_0 = 0$$

$$v_o = -\frac{1}{3}(v_a + v_b + v_c) \tag{2.17}$$

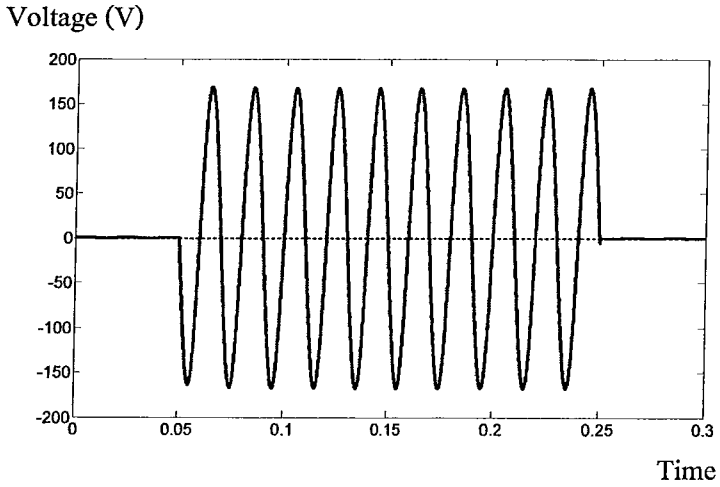
แรงดันเมื่อเกิดการอาร์คของเซอร์กิตเบรกเกอร์หาได้จากผลรวมของแรงดันของแหล่งจ่ายทั้ง 3 เฟส ดังสมการต่อไปนี้

$$v = v_{col} + v_g + v_{con} \tag{2.18}$$

เมื่อ v_{col} = voltage of arc column

v_g = voltage between deign plates

v_{con} = electrode fall voltage



รูปที่ 2.20 การตัดวงจรของเซอร์กิตเบรกเกอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส โหลด RL ความผิดพร่องแบบสมมาตร วัดแรงดัน และกระแสที่เฟส a

จากรูปที่ 2.20 แสดงรูปคลื่นของแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้า ที่ตกคร่อมเซอร์กิตเบรกเกอร์ 3 เฟส ขณะตัดวงจรไฟฟ้าเมื่อเกิดความผิดพร่องที่เวลา 0.05 วินาที ที่เฟส a ใช้เวลาในการตัดวงจรไฟฟ้าโดยสมบูรณ์ที่เวลา 0.058 วินาที

- วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส เมื่อเกิดความผิดพร่องแบบทันทีทันใดทำให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ปิดวงจรจะมีค่ากระแสทรานเซียนต์ไหลมากกว่าปกติในวงจรก่อนที่ความเหนี่ยวนำจะสร้างแรงดันต้านกลับออกมาก หามุมของแรงดันไฟฟ้า α สมการของแรงดันไฟฟ้า

$$v = E\sin(\omega t + \alpha)$$

สมการกระแส

$$i = \frac{E}{R}\left[\sin(\omega t + \alpha - \varphi) - \sin(\alpha - \varphi)e^{-\frac{R}{L}t}\right] \qquad (2.19)$$

เมื่อดูทั้งสององค์ประกอบ

ส่วนประกอบของกระแสสลับ (A.C. Component) หรือไซนูซอยด์ เกิดเฟสชิบของ φ ของแรงดันไฟฟ้า

ส่วนประกอบของกระแสตรง (D.C. Component) เมื่อเวลาผ่านไปจะลดขนาดลงเรื่อยๆ เนื่องจากค่าคงที่ของเวลา มี 2 กรณี

1. สภาวะสมมาตร $\alpha = \varphi$ แสดงลักษณะของกระแสสมมาตร

$$i = \frac{E}{R}\sin\omega t \qquad (2.20)$$

กระแสเริ่มต้นจากรูปคลื่นจนถึงสภาวะคงที่ และค่าสูงสุดคือ $\frac{E}{Z}$

2. สภาวะไม่สมมาตร $\alpha = 0$ แสดงลักษณะของกระแสไม่สมมาตร

$$i = \frac{E}{R}\left[\sin(\omega t - \varphi) + \sin\varphi e^{-\frac{R}{L}t}\right] \qquad (2.21)$$

- วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส จากกรณีที่ไม่มีโหลดในระบบ ถ้าเราปิดสวิตซ์จะเป็นการลัดวงจร จะทำให้ค่าความต้านเข้าใกล้ศูนย์ จะเขียนสมการของกระแสลัดวงจรได้ใหม่คือ

$$i = \frac{E}{\omega L}\left[\sin(\omega t + \alpha - 90) - e^{-\frac{Rt}{L}}\sin(\alpha - 90)\right] \qquad (2.22)$$

เมื่อ R<<L, $\theta = \tan^{-1}\infty \approx 90^{o}, \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \approx \omega L$

ค่าประกอบกระแสตรง จะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับการสับสวิตซ์ที่มุม α เท่าไร

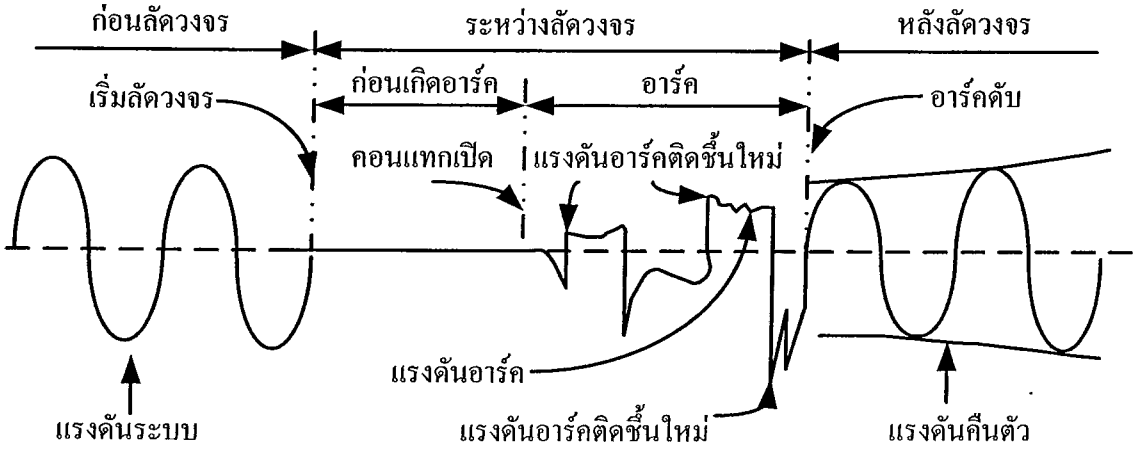
- ถ้าสับสวิตซ์ที่มุม $\alpha = 0$ ค่าประกอบกระแสตรงจะมีค่าสุงสุด เท่ากับ $\frac{E}{\omega L}$
- ถ้าสับสวิตซ์ที่มุม $\alpha = 90$ ค่าประกอบกระแสตรงจะมีค่าต่ำสุด เท่ากับศูนย์

การพิจารณากระแสลัดวงจรของแหล่งจ่ายไฟฟ้า 3 เฟส จะเห็นว่ากระแสทั้ง 3 เฟสมีค่าสูงขึ้นอย่างมากในช่วงไซเคิลแรก ค่ากระแสที่สูงกว่าคาปกตินี้เรียกว่า กระแสทรานเซียนต์ (Transient) และจะลดลงอย่างรวดเร็วใน 2-3 ไซเคิลถัดมา อัตราการลดลงจะช้าลงจนประมาณ 5 ไซเคิลเป็นต้นไปกระแสทรานเซียนต์จะหายไป กระแสจะเข้าสู่สภาวะคงที่ (Steady State)

2.4.5 การเลือกเซอร์กิตเบรกเกอร์

สภาวะลัดวงจรของเซอร์กิตเบรกเกอร์ของระบบไฟฟ้า แบ่งได้ดังนี้ [17]

1. สามารถเปิดวงจรขณะเกิดความผิดพร่อง และสามารถกำจัดความผิดพร่องได้
2. สามารถรับกระแสความผิดพร่องที่เกิดขึ้นได้
3. ปิดวงจรได้ในขณะเกิดความผิดพร่อง



รูปที่ 2.21 ค่าแรงดันไฟฟ้าก่อน ระหว่าง และหลังการเกิดการลัดวงจร

สิ่งที่ควรทราบ

1. จำนวนโพลว่าเป็นชนิด 1 โพล หรือ 3 โพล
2. ปริมาณกระแสสูงสุดที่เซอร์กิตเบรกเกอร์สามารถรับได้โดยอุณหภูมิไม่สูงเกินปกติ
3. ค่าพิกัดของแรงดันไฟฟ้าจะบอกมา 2 ค่าซึ่งเป็นค่าของแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส
   - ค่าแรงดันสูงสุดของระบบ ที่จะนำเซอร์กิตเบรกเกอร์ไปใช้งาน
   - ค่าแรงดันสูงสุดที่ออกแบบเป็นค่าแรงดันสูงสุดที่ใช้เป็นมูลฐานในการออกแบบ
4. ค่าที่ใช้ในการทดสอบความเป็นฉนวนโดยทดสอบที่ Power Frequency และ Impulse Voltage
5. ค่าความถี่ของระบบไฟฟ้าที่ใช้งานมีผลต่างความเร็วของเซอร์กิตเบรกเกอร์ เนื่องจาก 1 ไซเคิล เท่ากับ 1/50 วินาที = 0.02 วินาที
6. ค่ากระแสแต่ละโพลของเซอร์กิตเบรกเกอร์ (Breaking Current Rating) ขณะที่คอนแทคเริ่มแยกจากกัน มี 2 ค่า คือ

- Symmetrical Breaking Current = $\frac{Iac_{peak}}{\sqrt{2}}$ เป็นค่า RMS (2.23)

- Assymmetrical Breaking Current = $\sqrt{\left(\frac{Iac_{peak}}{\sqrt{2}}\right)^2 + I_{dc}^2}$ เป็นค่า RMS (2.24)

7. Breaking Capacity หรือ Interrupting MVA rating จะกำหนดอยู่ในเทอมของ MVA มีค่าเท่ากับMVA rating capacity 3 เฟส $=\sqrt{3} \times$ (Rated Breaking Current, kA) $\times$ (Rated service Voltage, kV)

8. ค่ากระแสสูงสุดที่เซอร์กิตเบรกเกอร์รับได้ถ้าต้องปิดวงจรในขณะที่เกิดความผิดพร่องโดยที่เซอร์กิตเบรกเกอร์ตัวอื่นๆกำลังกำจัดความผิดพร่องอยู่

9. ค่ากระแสสูงสุดที่เซอร์กิตเบรกเกอร์สามารถทนได้ในระยะเวลาสั้นๆขณะเกิดความผิดพร่อง โดยที่เซอร์กิตเบรกเกอร์ตัวอื่นๆกำลังกำจัดความผิดพร่องอยู่

10. ช่วงเวลาในการปลดสับวงจรของ เซอร์กิตเบรกเกอร์

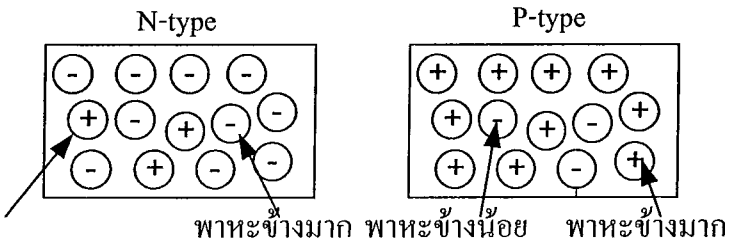
11 ค่าเวลาโดยเฉลี่ยในการตัดกระแส (Interrupt) ของเซอร์กิตเบรกเกอร์

2.5 อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง

อิเล็กทรอนิกส์ที่มีในปัจจุบันมีการพัฒนาอย่างกว้างขวางเพื่อรองรับการนำไปใช้งานอย่างทันสมัย และการที่นำอิเล็กทรอนิกส์มาใช้ในชีวิตประจำวันทำให้สามารถลดเวลาในการปฏิบัติงาน เพิ่มความสะดวกสบายและยังเพิ่มประสิทธิภาพให้กับงานที่ทำมากขึ้น เนื่องจากกระบวนการผลิตมีขั้นตอนที่ซับซ้อนมากขึ้นการที่ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ออกมามีคุณภาพตามที่ได้ออก แบบเอาไว้มีกลไกหลายอย่างเข้ามาเกี่ยวข้อง ดังนั้นได้มีการคิดค้นนำเอาเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์มาช่วยลดความซับซ้อนในกระบวนการผลิต ช่วยให้ระบบการควบคุมอัตโนมัติมีความสะดวกมากยิ่งขึ้นและทำงานได้ถูกต้องและมีความแม่นยำสูง

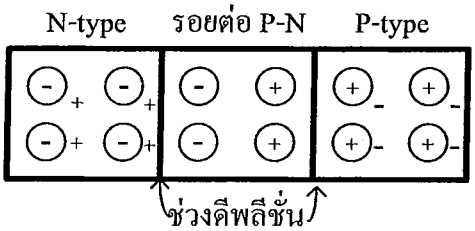
2.5.1 ศึกษาการทำงานของสารกึ่งตัวนำ

สารกึ่งตัวตำชนิดพี (P-type Semiconductor) มีอำนาจทางไฟฟ้าเป็นบวก สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-type Semiconductor) มีอำนาจทางไฟฟ้าเป็นลบ พาหะข้างมากและพาหะข้างน้อยสารกึ่งตัวนำชนิด N มีจำนวนอิเล็กตรอนอิสระเป็นจำนวนมากกว่าโฮล ส่วนสารกึ่งตัวนำชนิด P มีจำนวนโฮลมากกว่าอิเล็กตรอนอิสระ จำนวนของอิเล็กตรอนอิสระหรือโฮลนี้ เรียกว่า พาหะ (Carrier) ในสารกึ่งตัวนำชนิด N จะมีจำนวนอิเล็กตรอนอิสระ มากกว่าโฮล อิเล็กตรอนอิสระเหล่านี้เรียกว่า พาหะข้างมาก (Majority Carrier) ส่วนโฮลที่มีจำนวนเพียงเล็กน้อยในเนื้อสารเรียกว่า พาหะข้างน้อย (Minority Carrier) ในสารกึ่งตัวนำชนิด P จะมีโฮล เป็นพาหะข้างมาก ส่วนอิเล็กตรอนอิสระจะเป็น พาหะข้างน้อย [18]



รูปที่ 2.22 พาหะข้างน้อยและพาหะข้างมากในสารกึ่งตัวนำชนิด N และ P

1. รอยต่อพี-เอ็น การนำสารกึ่งตัวนำพีและเอ็นมาเชื่อมต่อกัน ณ จุดที่เชื่อมต่อจะเกิดเป็นรอยต่อที่เรียกว่า รอยต่อพี-เอ็น (P - N Junction) อิเล็กตรอนในสารเอ็นจะเคลื่อนที่ไปแทนที่โฮลในสารพีเกิดเป็นช่วงรอยต่อที่เรียกว่า ช่วงดีพลีชั่น (Depletion Region) และรอยต่อนี้ก็เกิดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้น จะมีค่ามากน้อยขึ้นอยู่กับจำนวนประจุที่เกิดขึ้นที่รอยต่อนั้น



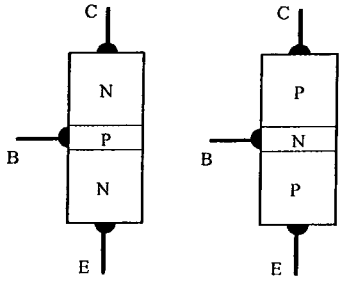
รูปที่ 2.23 การเกิดช่วงดีพลีชั่นเมื่อนำสารพีและเอ็นมาต่อกัน

2. การไบแอสสารกึ่งตัวนำพี-เอ็น เมื่อนำสารพี-เอ็นมาต่อกันเกิดช่วงดีพลีชั่นขึ้น ทำให้ในสภาวะปกติสารกึ่งตัวนำพี-เอ็นไม่สามารถนำกระแสได้ เมื่อต้องการให้นำกระแสก็ต้องมีพลังงานจากภายนอกจ่ายแรงดันให้แก่สารกึ่งตัวนำเริ่มด้วยต่อแรงดันขั้วบวกเข้าที่สารพี และขั้วลบเข้าที่สารเอ็น อิเล็กตรอนจากขั้วลบของแหล่งจ่ายแรงดัน จะผลักอิเล็กตรอน ในสารเอ็นให้เคลื่อนที่ข้ามช่วงดีพลีชั่น ในขณะเดียวกันแรงดันที่จ่ายให้นี้ก็จะทำให้อิเล็กตรอนในสารพีเคลื่อนที่ออกมาและเคลื่อนที่ไป ยังขั้วบวกของแหล่งจ่ายแรงดัน ดังนั้นจึงเกิดช่องว่างหรือโฮลขึ้น อิเล็กตรอนจากสารเอ็นจึงสามารถเข้ามารวมได้ทำให้สารกึ่งตัวนำ สามารถนำกระแสได้ การจ่ายแรงดันเข้าที่จุดต่อของสารพี-เอ็นนี้เรียกว่า การไบแอส (Bias)

2.5.2 ศึกษาศึกษาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง

1. ทรานซิสเตอร์ (Transistor) คือ สารกึ่งตัวนำมีสามขา ใช้กระแสหรือแรงดันไฟฟ้าเพียงเล็กน้อยที่ขาหนึ่งจะควบคุมกระแสที่มีปริมาณมากที่ไหลผ่านขาทั้งสองข้างได้ ทรานซิสเตอร์ชนิดสองรอยต่อเรียกด้ายตัวย่อว่า BJT (Bipolar Junction Transistor) ถูกนำไปใช้งานอย่างแพร่หลาย ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ทำหน้าที่เป็นสวิทซ์ (Switching) เช่น เปิด-ปิด รีเลย์ (Relay) เพื่อควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้า

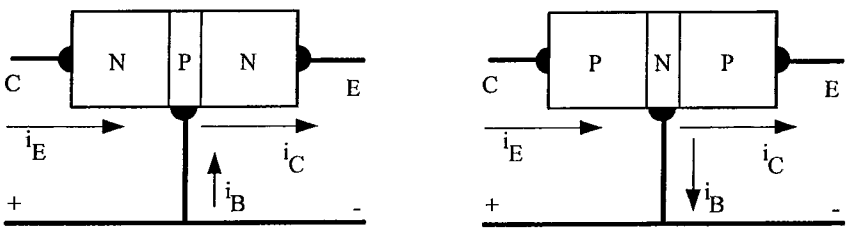
- โครงสร้างของทรานซิสเตอร์ชนิดสองรอยต่อหรือ BJT ประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำชนิดพีและเอ็นต่อกัน โดยการเติมสารเจือปน (Doping) จำนวน 3 ชั้นทำให้เกิดรอยต่อ (Junction) ขึ้นจำนวน 2 รอยต่อ การสร้างทรานซิสเตอร์จึงสร้างได้ 2 ชนิด คือ ชนิดที่มีสารชนิด N 2 ชั้น เรียกว่าชนิด NPN และชนิดที่มีสารชนิด P 2 ชั้น เรียกว่าชนิด PNP โครงสร้างของทรานซิสชนิด NPN และชนิด PNP แสดงดังรูปที่ 2.25



(ก) NPN (ข) PNP

รูปที่ 2.25 โครงสร้างของทรานซิสเตอร์

- การทำงานเบื้องต้นของทรานซิสเตอร์ ทั้งชนิด NPN และ PNP เมื่อนำไปใช้งานในวงจรขยายสัญญาณ (Amplifier) หรือทำงานเป็นสวิตช์ ต้องทำการไบอัสทรานซิสเตอร์ทำงานได้ โดยใช้หลักการไบอัสดังนี้ ไบอัสตรงให้กับรอยต่อระหว่างอิมิตเตอร์กับเบส ไบอัสกลับให้กับรอยต่อระหว่างคอลเลกเตอร์กับเบส พิจารณาการไบอัสทรานซิสเตอร์ชนิด NPN ดังรูปที่ 2.26 (ก) จะเห็นว่าทำการไบอัสตรงให้กับรอยต่ออิมิตเตอร์-เบส โดยให้ศักดาบวกกับเบส (เพราะเบสเป็น P) และให้ศักดาลบกับอิมิตเตอร์ (เพราะอิมิตเตอร์เป็น N) เช่นเดียวกันต้องให้ไบอัสกลับกับรอยต่อคอลเลกเตอร์-เบส โดยให้ศักดาบวกกับคอลเลกเตอร์ (เพราะคอลเลกเตอร์เป็น N) และให้ศักดาลบกับเบส (เพราะเบสเป็น P) นี่คือการไบอัสทรานซิสเตอร์ชนิด NPN ที่ถูกต้องตามเงื่อนไข 2 ข้อที่กำหนดไว้ การไบอัสทรานซิสเตอร์ชนิด PNP ก็กระทำเช่นเดียวกันดังรูปที่ 2.26 (ข) ทรานซิสเตอร์ทั้งชนิด NPN และ PNP เมื่อได้รับไบอัสที่ถูกต้องแล้วจะเกิดกระแสเบส (IB) กระแสคอลเลกเตอร์ (IC) และกระแสอิมิตเตอร์ (IE) ไหลผ่านรอยต่อดังรูปที่ 2.26

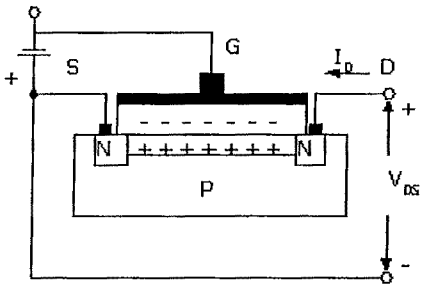


(ก) ไบอัสตรงให้กับรอยต่ออิมิตเตอร์-เบส (ข) ไบอัสตรงให้กับรอยต่ออิมิตเตอร์-เบส

รูปที่ 2.26 ทิศทางกระแสที่เกิดจากการไบอัสที่ถูกต้อง

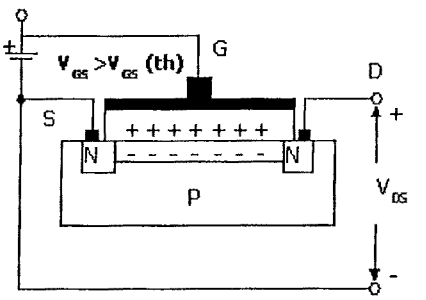
2. มอสเฟส Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor เป็นเฟตที่ประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำ มีข้อเด่นคือ มีค่าความต้านทานอินพุต (หมายถึงค่าความต่านทานที่เกต) สูงมาก ที่ขั้วต่อขาเกตของมอสเฟตจะมีฉนวนกั้นกลาง ขาเกตจึงไม่ถูกต่อเข้าโดยตรงกับโครงสร้าง

ของสารกึ่งตัวนำ มอสเฟตยังแบ่งเป็น 2 แบบ คือ แบบดีพลีชั่น (Depletion) และแบบเอนฮานซ์เมนต์ (Enhancement) การทำงานของมอสเฟตแบบดีพลีชั่น พิจารณาจากรูปที่2.27 ให้ขาเกตมีแรงดันเป็นลบ เมื่อเทียบกับขาซอร์สจะทำให้มีประจุลบเกิดขึ้น ที่ขาเกต และเกิดประจุบวกปรากฏขึ้นทางด้านที่ติดฉนวนซิลิกอนออกไซด์ ส่งผลให้เนื้อสารเอ็นที่มีอยู่น้อยมีขนาดลดลง ทำให้ช่องว่างระหว่าง ขาเดรนและซอร์สมากขึ้น กระแสก็จะไหลได้น้อยลง ลักษณะการทำงานเหมือนกับการทำงานของเจเฟต



รูปที่ 2.27 โครงสร้างของมอสเฟตแบบ Depletion

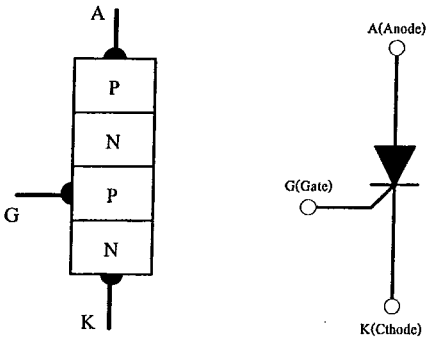
การทำงานของมอสเฟตแบบเอนฮานซ์เมนต์ พิจารณาจากรูปที่ 2.27 เนื่องจากระหว่างสารเอ็นที่ขาเดรนและซอร์สเป็นสารพี ซึ่งแตกต่าง จากมอสเฟตแบบดีพลีชั่น ทำให้เมื่อป้องแรงดันบวกเข้าที่ขาเกต จะเกิดประจุลบขึ้นทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากสารเอ็นที่ขาซอร์สมายังเดรนได้ จึงทำให้มอสเฟตทำงานได้ ดังนั้นมอสเฟตแบบนี้จะทำงานได้ต้องป้องแรงดันที่ขาเกตเป็นแรงดันบวกเท่านั้น และแรงระหว่างขาเกตและซอร์ส (Vgs) ที่ป้อนให้นี้ต้องมีค่ามากกว่า Vgs (th) (Gate Source threshold voltage)



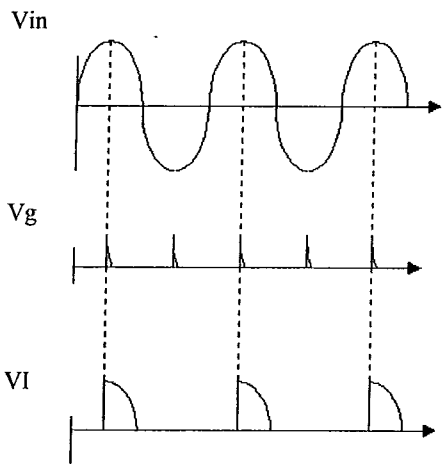
รูปที่ 2.28 โครงสร้างของมอสเฟตแบบ Enhancement

เอสซีอาร์ (SCR) เป็นอุปกรณ์ที่ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อใช้ทำหน้าที่เป็นโซลิดสเตตสวิตช์ ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการควบคุมการจ่ายกำลังไฟให้แก่อุปกรณ์หรือวงจร เอสซีอาร์ เป็นอุปกรณ์ที่

นำกระแสได้ทิศทางเดียว ประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำชนิด Pและ N วางซ้อนกัน 4 ชั้น ทำให้เกิดรอยต่อ 3 รอยต่อ เราเรียกอุปกรณ์พวกนี้ว่า ว่าไทริสเตอร์ (Thyristor)



รูปที่ 2.29 โครงสร้างของและสัญลักษณ์ของเอสซีอาร์



รูปที่ 2.30 การเปลี่ยนแปลงค่าของกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่โหลด
โดยกำหนดได้จากตำแหน่งเวลาของการทริกที่ให้แก่เอสซีอาร์

การทำงานของเอสซีอาร์ การทำให้เอสซีอาร์ให้นำกระแส โดยการป้อนแรงดันไฟฟ้าบวกที่ขั้วเกตที่เรียกว่าจุดชนวนเกตหรือสัญญาณทริกเกอร์ (Triggered) การหยุดการทำงานของเอสซีอาร์ คือลดค่ากระแสที่ไหลผ่านขั้วแอโนดลง จนต่ำกว่าค่าที่เรียกว่า กระแสโฮลดิ้ง (Holding current) หรือเรียกว่า Ih และในกรณีที่เอสซีอาร์ถูกใช้งานโดยการป้อนกระแสสลับผ่านตัวมัน การหยุดทำงานของมันจะเกิดขึ้นโดยอัตโนมัติ เมื่อค่าแรงดันไฟสลับที่ให้นั้นใกล้กับจุดที่เรียกว่า "จุดตัดศูนย์" (Zero-Crossing Point) ซึ่งจะเกิดขึ้นทุก ๆ ครึ่งคาบเวลาของสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับจ่ายที่ให้แก่วงจร

ข้อสำคัญคือการเลือกอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มาใช้ให้เหมาะกับงานที่ต้องการ จะพบว่าในการเลือกอุปกรณ์แต่ละชนิดและแต่ละเบอร์นั้น ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติเฉพาะของแต่ละเบอร์ เช่นค่าแรงดันและกระแสสูงสุดที่จะทนได้ ค่าความไว อุณหภูมิใช้งาน ตามตาราง Data Sheet ได้แสดงถึงคุณสมบัติของอุปกรณ์ในเบอร์ต่างๆ เพื่อความสะดวกในการเลือกใช้งาน

2.5.3 การเลือกอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง เพื่อออกแบบSSCB

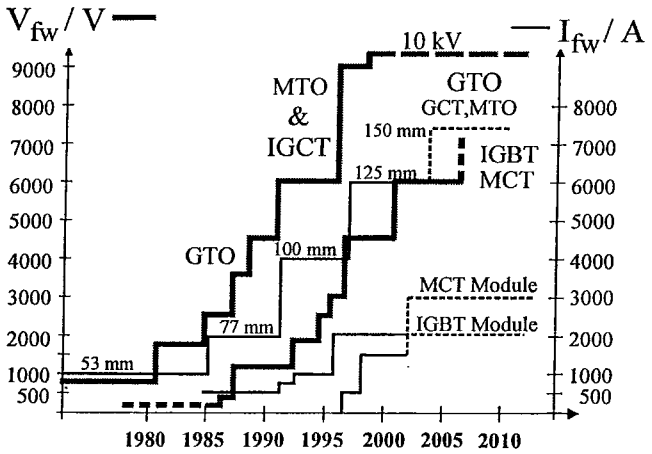
อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบันมีการนำมาใช้กับงานระบบไฟฟ้ากำลัง หรืองานในระบบควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยแบ่งตามความสามารถและการควบคุม การทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ที่แตกต่างกันออกไป ที่คุ้นเคยและใช้งานอย่างกว้างขวางก็ได้แก่ เอสซีอาร์ (SCR) ไตรแอก (TRIAC) ทรานซิสเตอร์กำลังและมอสเฟต โดยเฉพาะทรานซิสเตอร์และมอสเฟต เป็นจุดพัฒนาการของอุปกรณ์ชนิดใหม่ๆ ซึ่งอุปกรณ์ทั้งสองชนิดมีคุณสมบัติแตกต่างกัน กล่าวคือ ทรานซิสเตอร์กำลังขณะอยู่ในสภาวะนำกระแส จะมีอัตราการสูญเสียกำลังงานต่ำ มีอัตราแรงดันและขยายกระแสได้สูงแต่ความเร็วในการสวิตช์ทำงานต่ำโดยเฉพาะช่วงหยุดนำกระแส จะมีช่วงเวลาที่ยาวมอสเฟส คุณสมบัติของมอสเฟตกำลังมีความเร็วในการสวิตช์ทำงานนำกระแสและหยุดนำกระแสได้เร็ว แต่มีอัตราการสูญเสียกำลังงานสูง

วิวัฒนาการของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังแสดงระดับ Voltage, Current, Frequency ของอุปกรณ์ Power Switching Devices ต่างๆ เพื่อใช้ในการเลือกอุปกรณ์ เช่น Thyristor จะทนแรงดันและกระแสได้มากแต่ไม่สามารถทำงานที่ความถี่สูงได้ Thyristor และ GTO นั้นส่วนมากจะใช้กับความถี่ 50 Hz. ใช้ในงาน Phase Control ส่วน BJT, IGBT, MOSFET นั้นจะใช้ในงานควบคุมที่ต้องมีการตอบสนอง (Response Time) อย่างรวดเร็ว

เหตุผลในการเลือกอุปกรณ์ที่ใช้ในการสวิตชิ่งของโซลิดสเตท การเกิดความผิดพร่องขึ้นในระบบไฟฟ้า เกิดจากกระแสลัดวงจร อุปกรณ์ที่นำมาใช้ต้องสามารถกำหนดขอบเขตของการเกิดอินเตอร์รัพท์ และต้องสามารถรับกระแสลัดวงจรได้ มีคุณสมบัติ

- อัตราการทนแรงดันไฟฟ้าสูง
- สามารถควบคุมกระแสสูงๆได้ (IGBT ทนกระแสสูงๆได้)
- สามารถสั่งการให้นำกระแส หรือหยุดนำกระแสได้
- ทนความถี่สวิตชิ่ง และการเกิดการสูญเสียได้
- จุดต่อของสารกึ่งตัวนำสามารถทนอุณหภูมิสูงได้
- มีพื้นที่ของสำหรับการเกิดแลตช์
- เกิดทรานเซียนท์ต่ำ

อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่เหมาะสำหรับการสวิตชิ่งเมื่อเกิดความผิดพร่องในระบบ และสามารถสั่งให้ ON หรือ OFF ได้ จากเหตุผลที่กล่าวมา ทรานซิสเตอร์กำลังและมอสเฟตกำลัง จึงได้มีการพัฒนาอุปกรณ์ จนสามารถได้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังชนิดใหม่ขึ้นมา โดยคุณสมบัติของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังนี้จะรวมเอาข้อดีของทรานซิสเตอร์กำลังแบบไบโพล่าร์ และมอสเฟตกำลัง รวมไว้ในอุปกรณ์ชนิดใหม่นี้ เรียกชื่ออย่างเป็นทางการว่า ไอจีบีที (Insulate Gate Bipolar Transistor : IGBT)



รูปที่ 2.31 วิวัฒนาการของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง

(Prof. R.W. De Doncker, RWTH-Berlin)

2.5.4 โครงสร้างและสัญลักษณ์

ไอจีบีที ค่อนข้างจะเป็นอุปกรณ์ชนิดใหม่ ซึ่งสัญลักษณ์ของไอจีบีทีมีลักษณะคล้ายกับ ทรานซิสเตอร์กำลังแบบไบโพล่าร์กับมอสเฟตกำลังรวมกันโดยที่ขาเกต มีสัญลักษณ์คล้ายมอสเฟต เพราะมีค่าเกตอินพีแดนซ์สูง (10 เมกกะโอห์ม) และมีสัญลักษณ์คล้ายทรานซิสเตอร์แบบไบโพล่าร์ที่ขา D-S เนื่องจากมีโครงสร้างคล้ายทรานซิสเตอร์แบบไบโพล่าร์และมีค่า V_{CE} (On) ต่ำ (0.2 V) ไอจีบีที จึงได้รับความนิยมในการใช้งานสวิตชิ่ง มากเพราะมีคุณสมบัติที่ดีทรานซิสเตอร์กำลังแบบไบโพล่าร์ กับ มอสเฟตกำลังรวมกันอยู่ [19]

เหตุผลในการเลือกไอจีบีทีมาใช้งาน

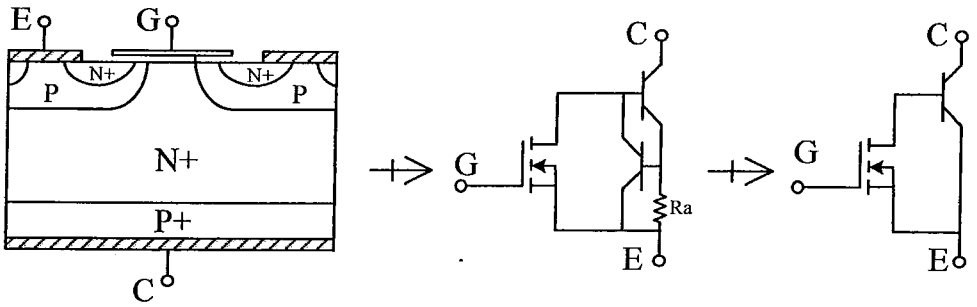
1. สามารถควบคุมการนำกระและหยุดนำกระแสได้โดยควบคุมแรงดันที่ขาเกต

2. การนำข้อดีของทรานซิสเตอร์กำลัง (BJT) กับ มอสเฟส (MOSFET) และจีทีโอไธริสเตอร์ มารวมกัน คือ มีค่าอิมพีแดนซ์ที่ขาเกตสูงคล้ายมอสเฟสกำลัง ต้องการพลังงานน้อยมาก

สำหรับการควบคุมสวิตช์ มีแรงดันตกคร่อมขณะนำกระแสต่ำประมาณ 2-3 โวลท์เหมือนทรานซิสเตอร์กำลัง และทนแรงดันต้านลบได้คล้ายกับจีทีโอริสเตอร์

2.5.5 วงจรสมมูลของไอจีบีที

วงจรสมมูลของไอจีบีทีดังรูปที่ 2.32 ในรูปที่ 2.32 (ก) ในบริเวณบอดี้ P บริเวณ N- และชั้นอินเจ็กติ้ง P+ คล้ายกับทรานซิสเตอร์ชนิดพีเอ็นพี โดยแทนด้วยขาเดรน ขาเกต และขาซอร์ส รูปที่ 2.32 (ข) เห็นว่าเป็นวงจรดาร์ลิงตัน มีมอสเฟตเป็นตัวขับทรานซิสเตอร์พีเอ็นพี รูปที่ 2.32 (ค) แสดงให้เห็นวงจรภายในไอจีบีทีมีไทริสเตอร์แฝงอยู่โดยดูจากการทีมีทรานซิสเตอร์เอ็นพีเอ็นและพีเอ็นพีต่อเข้าด้วยกันในลักษณะที่มีการป้อนกลับ ทำให้เห็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการแลตช์ของไอจีบีที



(ก) (ข) (ค)

รูปที่2.32 (ก) แสดงโครงสร้างที่มีทรานซิสเตอร์และมอสเฟตแฝงอยู่ภายใน
(ข) วงจรสมมูลสำหรับการทำงานสภาพปกติของไอจีบีที
(ค) วงจรสมมูลที่แสดงส่วนของไทริสเตอร์ที่แฝงอยู่ในไอจีบีที

2.5.6 สภาวะนำกระแส

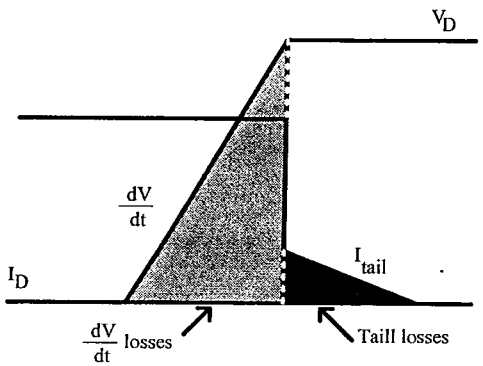
เมื่อขาเดรนได้รับแรงดันไบแอสตรง คือมีค่าเป็นบวกเทียบกับขาซอร์ส แรงดันระหว่างขาเกตกับขาซอร์สมีค่าเกิน Vgs(th) ประจุไฟฟ้าบวกที่เกิดจากแรงดันที่ขาเกตจะดึงอิเล็กตรอน ให้มารวมกันอยู่ในบริเวณใต้ขาเกต ทำให้ชั้นบอดี้ตรงส่วนใต้ขาเกตแปรสภาพเป็น N ทำให้เกิดการต่อกันของบริเวณ N- เข้ากับบริเวณ N+ ลักษณะแบบนี้เหมือนกับการทำงานของมอสเฟต

กระแสที่ไหลจากขาซอร์สผ่านบริเวณใต้ขาเกตมายังลอยเลื่อน N- จะรวมกับโฮลที่เป็นพาหะข้างน้อยที่ถูกฉีดมาจากชั้นอินเจ็กติ้ง P+ เนื่องจากรอยต่อ J1 ได้รับแรงดันไบแอสตรง ทำให้ไอจีบีทีอยู่ในสภาวะนำกระแส เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าจากขาเดรนไปยังขาซอร์สได้ ผ ล ของการมอดูเลตนี้ทำให้ความต้านทานของบริเวณ N- มีค่าต่ำลง เป็นการเพิ่มความสามารถ ในการ

ขับผ่านกระแสได้สูงขึ้น เหมือนกับลักษณะของทรานซิสเตอร์กำลัง ผลของความต้านทานที่ลดลง ทำให้แรงดันตกคร่อมที่สภาวะนำกระแสลดลง การสูญเสียกำลังงานขณะนำกระแสจึงลดลง

2.5.7 สภาวะหยุดนำกระแส

เมื่อแรงดันระหว่างขาเกตและขาซอร์ส ลดลงต่ำกว่าแรงดัน Vgs(th) ทำให้มีแรงดันไม่เพียงพอสำหรับการแปรสภาพชั้นบอดี้ P เป็น N ได้ ทำให้บริเวณ N- ไม่ต่อกับบริเวณขาซอร์ส N+ ไอจีบีที จึงอยู่ในสภาวะหยุดนำกระแส ในสภาวะนี้ที่รอยต่อ J2 ได้รับแรงดันไบแอสกลับ ทำให้เกิดกระแสรั่วไหลเพียงเล็กน้อยเท่านั้น จึงเหมาะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ



รูปที่ 2.33 สภาวะหยุดนำกระแสของไอจีบีที [20]

การ Turn-off ของไอจีบีที สามารแยกออกเป็นระยะเวลาซึ่งแตกต่างกันอย่างชัดเจน เป็นสองส่วน ดังแสดงในรูปที่ 2.33 ในช่วงเวลาแรก มันมีพฤติกรรมเหมือนกับการทำงานของ MOSFET การเพิ่มขึ้นของแรงดันไฟฟ้า (dV/dt) เป็นไปอย่างรวดเร็ว และการลดลงของกระแสสวิตชิ่ง การสูญเสียในช่วงเวลาของ(dV/dt) ส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับความเร็วของแรงดันที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถควบคุมโดยความต้านทานที่ขาเกต ช่วงเวลาต่อมา"Tail Current" โดยเฉพาะของไอจีบีที มันเป็นช่วงเวลาขณะหนึ่งที่มีแรงดันจำนวนมากไหลผ่านตัวอุปกรณ์ ซึ่งทำให้เกิดการสูญเสียขณะ Turn-off ผลของค่าความสูญเสียทั้งหมดแสดงให้เห็นดังรูปที่ 2.33 ในปริมาณสีที่แตกต่างกันออกไป

สำหรับการเพิ่มความเร็วในการขับขาเกตที่ใช้สำหรับการสวิตชิ่ง

ข้อดีของไอจีบีที

- ทำให้แรงดันตกคร่อมขณะนำกระแสต่ำลง เป็นผลให้การสูญเสียกำลังงานลดน้อยลง
- ช่วยลดช่วงเวลาหยุดนำกระแสให้สั้นลง

ข้อเสียของไอจีบีที

การเพิ่มชั้นบัฟเฟอร์ N+ ผลเสียคือจะลดความสามารถของอัตราทนแรงดันย้อนกลับให้น้อยลงมีอัตราการทนเพียงไม่กี่สิบโวลต์ ทั้งนี้เมื่อไอจีบีทีได้รับแรงดันไบแอสกลับที่ขาเดรนรอยต่อ J1 ซึ่งทั้งสองข้างมีความหนาแน่นในการโด๊ปสารมาก ไม่สามารถทนแรงดันย้อนกลับได้สูง

2.5.8 การแลตช์ในไอจีบีที

นอกจากกระแสโฮลในส่วนที่รวมกับอิเล็กตรอนภายใต้บริเวณ N- แล้ว ยังมีกระแสโฮล บางส่วนที่ไหลข้ามบริเวณ N- เข้าสู่บริเวณชั้นบอดี้ P โดยตรงกระแสโฮลนี้ส่งผลให้เกิดแรงดันตกคร่อมความต้านทานข้างเคียง และถ้าแรงดันนี้มีค่ามากพอ คือประมาณ 0.7 โวลต์ จะทำให้รอยต่อ J3 ได้รับไบแอสตรงเป็นผลให้อิเล็กตรอน จากบริเวณซอร์ส N+ ถูกฉีดเข้าไปในชั้นบอดี้ P ซึ่งจะหมายถึงขาเบสและขาอิมิตเตอร์ ได้รับแรงดันไบแอสตรงส่งผลให้ไทริสเตอร์ ซึ่งแฝงอยู่ในโครงสร้างของไอจีบีทีอยู่ในสภาวะแลตช์ การนำกระแสทำให้ขาเกตไม่สามารถควบคุมปริมาณกระแสของขาเดรนดังนั้นจึงขึ้นอยู่กับความต้านทานที่นำมาต่อในวงจรภายนอก และถ้ามีการแลตช์เกิดขึ้นเป็นเวลานาน อาจทำให้ไอจีบีทีเสียหายได้ เพราะมีการสูญเสียกำลังงานเกินค่าพิกัดที่ทนได้

ส่วนใหญ่เป็นตามมาตรฐานหรือคู่มือของผู้ผลิต จะมีการบอกค่ากระแสเดรนสูงสุด ที่สามารถไหลผ่านไอจีบีทีได้ โดยยังไม่เกิดการแลตช์ขึ้น แต่เนื่องจากกระแสเดรนถูกควบคุมโดยตรง จากแรงดันระหว่างขาเกตกับขาซอร์ส ดังนั้นคู่มือจึงบอกค่าแรงดันระหว่างขาเกตและขาซอร์สสูงสุด ที่ไม่ทำให้เกิดการแลตช์ แทนการบอกค่ากระแสเดรนสูงสุด

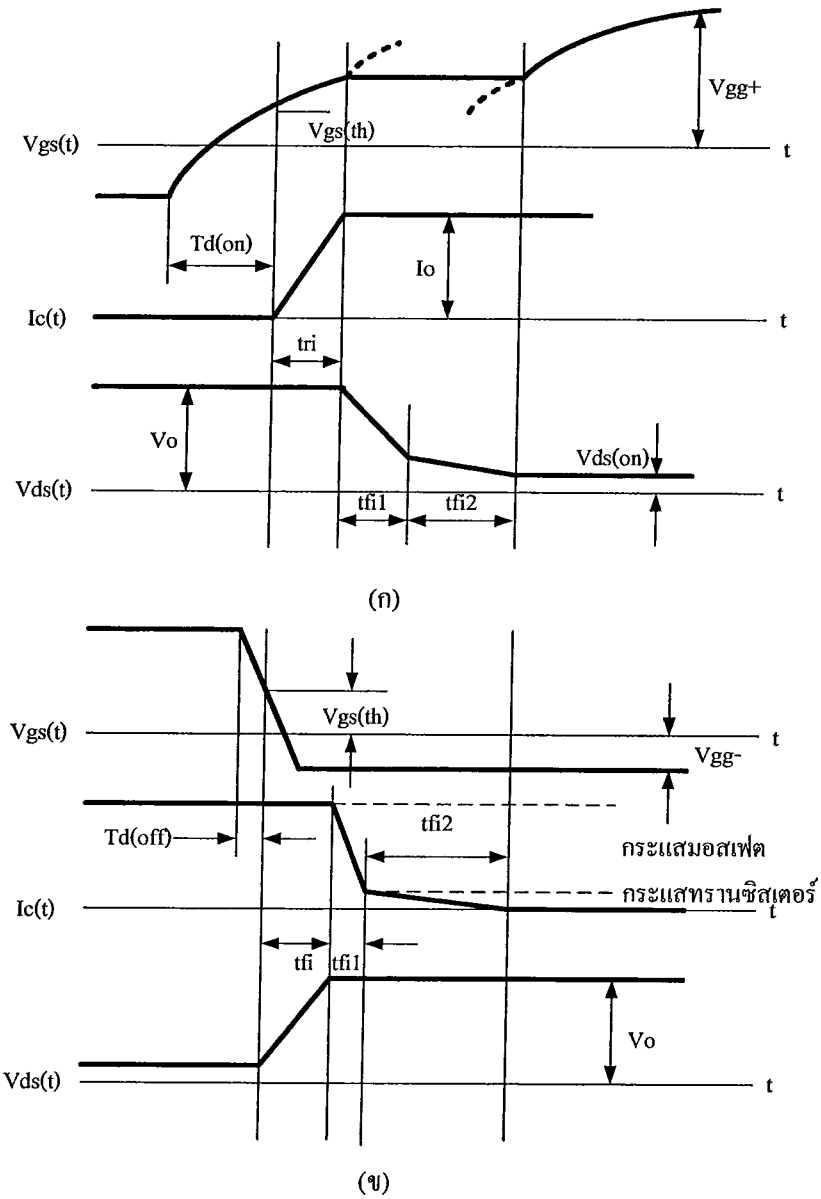
การป้องกันการแลตช์

1. ทำได้โดยลดความกว้างของบริเวณซอร์ส N+ ลง นั่นคือลดค่า Ls
2. การแบ่งระดับความหนาแน่นในการโด๊ปสารของบริเวณบอดี้ P
3. สำหรับผู้ใช้งาน สามารถป้องกันการแลตช์

- โหมดสแตติกโดยออกแบบไม่ให้กระแสที่ไหลในโหลด ไหลเกินค่ากระแสเดรน
- โหมดไดนามิกโดยหน่วงเวลาขณะหยุดนำกระแสให้ยาวนานขึ้น เพื่อให้โฮลที่ยังค้างอยู่ใน บริเวณ n- มีเวลาพอที่จะรวมกับอิเล็กตรอน เป็นการลดกระแสที่ไหลผ่านความต้านทานข้างเคียงให้น้อยลง ทำได้โดยเพิ่มความต้านทานภายนอกอนุกรมเข้ากับขาเกตของไอจีบีที

2.5.9 ลักษณะการสวิตช์

ลักษณะของสัญญาณกระแสและแรงดันในช่วงเวลาที่เกิดการนำกระแสและหยุดนำกระแส ดังรูปที่ 2.34



รูปที่ 2.34 (ก) ลักษณะของกระและแรงดันขณะนำกระแส
(ข) ลักษณะของกระแสและแรงดันขณะหยุดนำกระแส

ช่วงเวลาในการนำกระแสของไอจีบีทีแสดงในรูปที่ 2.34 (ก) มีลักษณะคล้ายกับการนำกระแสของมอสเฟต คือ มีเวลาก่อนการนำกระแส (Tc(on))นับตั้งแต่เวลาที่แรงดันระหว่างขาเกตกับขาซอร์ส อยู่ในช่วง Vgg- จนถึง (Vgs(th)) การป้อนแรงดันนี้จะมีการเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดจากค่า Vgg- เป็น Vgg+ มีลักษณะเป็นเอ็กซ์โปเนนเชียล ซึ่งเป็นผลจากการชาร์จประจุ ของตัวเก็บประจุระหว่างขาเกตกับขาซอร์ส และขาเกตกับขาเดรนภายในไอจีบีที แรงดันที่ขาเดรนยังคงอยู่ในช่วงเวลาขาขึ้น (Tri) หรือในช่วงเวลาที่กระแสที่ขาเดรนยังไม่ถึงค่ากระแสทำงาน (Io) หลังจากนั้น

กระแสที่ขาเดรนก็จะคงที่ แต่แรงดันจะตกลงสู่ค่า(Vds(on)) โดยแบ่งช่วงเวลาลงเป็นสองช่วง คือ ช่วง Tfi1 เป็นช่วงที่ทำงานอยู่ในย่านความต้านทานสูง ส่วนTfv2 ช่วงที่ทำงานอยู่ในย่านความต้านทานต่ำ

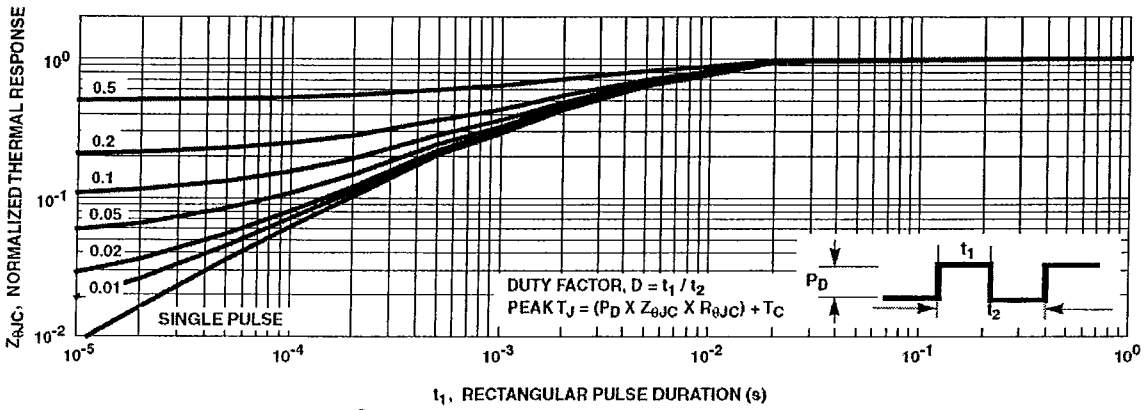
ช่วงเวลาในการหยุดกระแสของไอจีบีทีแสดงในรูปที่ 2.34 (ข) จะเห็นว่ากระแสที่ขาเดรนจะคงที่อยู่ตลอดช่วงเวลาที่แรงดันที่ขาเดรนเพิ่มขึ้น และมีช่วงเวลาลงของกระแสที่ขาเดรนที่แตกต่างชัดเจนสองช่วง โดยช่วงแรก Tfi1 จะเป็นช่วงหยุดนำกระแสของมอสเฟต ภายในไอจีบีที และช่วง Tfi2 จะเป็นช่วงหยุดนำกระแสของทรานซิสเตอร์พีเอ็นพี ซึ่งจะช้ากว่ามอสเฟต ทำให้ช่วงเวลานี้นานกว่าช่วงแรก

2.5.10 การเลือกไอจีบีทีตามคุณสมบัติใน data sheet ตัวที่เลือกใช้

1. คุณสมบัติเบื้องต้นของตัวอุปกรณ์ที่นำมาใช้ IGBT เบอร์ HGTG18N120BND เป็นชนิด NPT สามารถนำใช้งานทั้งไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับ พิกัดกระแสสูงสุดที่ 54 A. พิกัดแรงดันสูงสุด 1200 V. ที่พิกัดอุณหภูมิที่ 25 °C [21]

2. อัตราสูงสุดในการนำไปใช้งาน

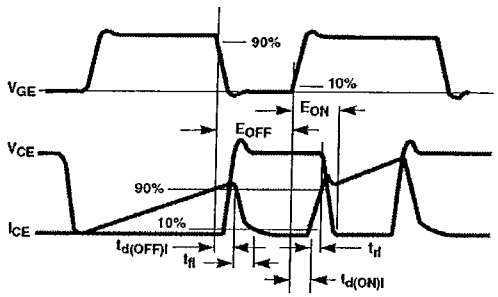
- การเกิดทรานเซียนอิมพีแดนซ์ของไอจีบีทีเป็นค่าที่เกิดขึ้นของการสวิตช์ของสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นจึงต้องมีการออกแบบอุปกรณ์ป้องกันให้กับตัวอุปกรณ์ไอจีบีที เป็นค่าของการทดสอบอุปกรณ์ตาม Datasheet ของอุปกรณ์ จากรูปที่ 2.35



รูปที่ 2.35 Datasheet ของ IGBT เบอร์ HGTG18N120BND

- อุณหภูมิที่เกิดที่จุดเชื่อมต่อของไอจีบีที การเกิดค่าสูญเสียในการสวิตชิ่งของอุปกรณ์แต่ละตัว เกิดจากค่าของกระแสและแรงดัน สำหรับไอจีบีทีมีค่าสูญเสียที่เกิดขึ้น 3 ช่วงคือ P_{on} ,P_{sat} ,P_{off} จากรูปที่ 2.36 เกิดจากการรั่วไหลของกระแส ค่าสูญเสียเกิดขึ้นระหว่าง ในการหยุดนำกระแสของไอจีบีที ซึ่งค่า P_{sat} มีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับค่าสูญเสียทั้งหมดจึงไม่นำมาคิดในการคำนวณ

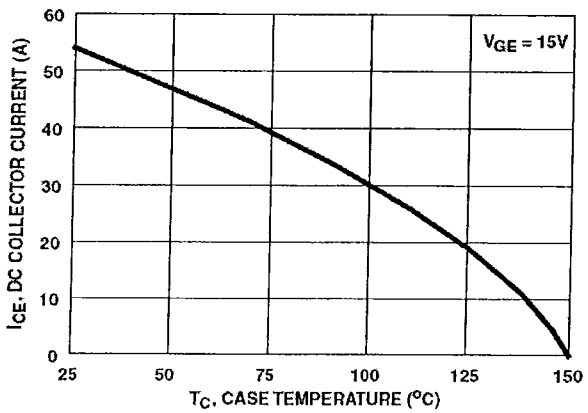
ดังนั้นพิจารณาการเกิดค่ากำลังการสูญเสียในช่วง P_{on} P_{off} และ ค่าสูญเสียอิ่มตัว



รูปที่ 2.36 การทดสอบ IGBT เบอร์ HGTG18N120BND

อย่างไรก็ตามในการคำนวณค่าสูญเสียที่เกิดขึ้นที่ตัวไอจีบีที ต้องคำนึงถึงแรงดันและกระแสที่เกิดในระหว่างช่วงสวิตชิ่งเป็นอันดับแรก

3. อัตราการทนอุณหภูมิของไอจีบีที



รูปที่ 2.37 พิกัดกระแส I_{CE} ในสภาวะของอุณหภูมิใช้งาน

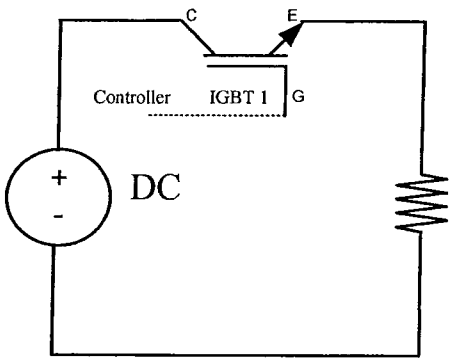
จากรูป แสดงพิกัดกระแส I_{CE} ในสภาวะของอุณหภูมิใช้งานที่พิกัดกระแสใช้งานเพิ่มขึ้น อัตราการทนอุณหภูมิใช้งานของตัวอุปกรณ์จะน้อยลง

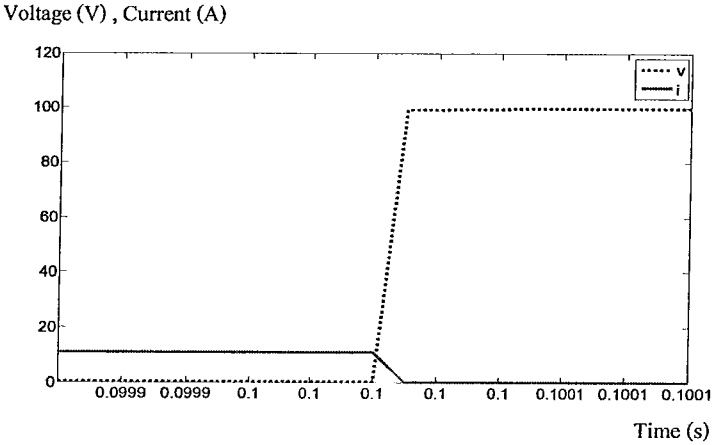
4. คุณสมบัติทางไฟฟ้า การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวอุปกรณ์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการช่วงสภาวะนำกระแสและหยุดนำกระแสที่โหลด R L

ตารางที่ 2.4 พารามิเตอร์ของวงจรที่ใช้ในการจำลองเพื่อทดสอบไอจีบีที

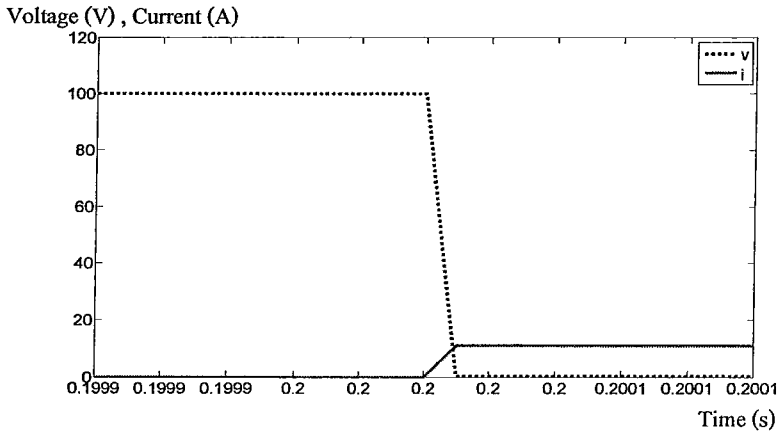
พารามิเตอร์ของแหล่งจ่าย	
Vdc	100 V
พารามิเตอร์ของโหลด	
R_L	9 Ω
L_L	0.02 H
พารามิเตอร์ของไอจีบีที ทดสอบ IGBT เบอร์ HGTG18N120BND ที่อุณหภูมิ 150 °C	
R_g	0.01 Ω
L	1 μH
10% ของ t_{fi}	20 nS
t_{ri}	22 nS

การจำลองสภาวะนำกระแส และหยุดนำกระแสของไอจีบีที เมื่อต่อกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ที่โหลด R





(ก) สภาวะหยุดนำกระแส

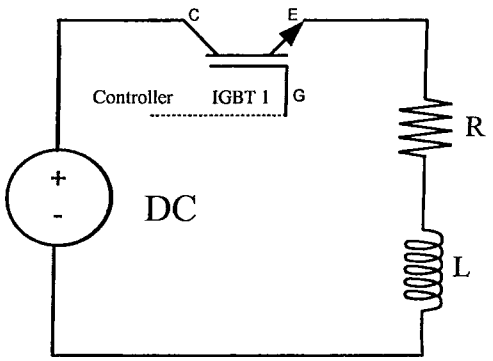


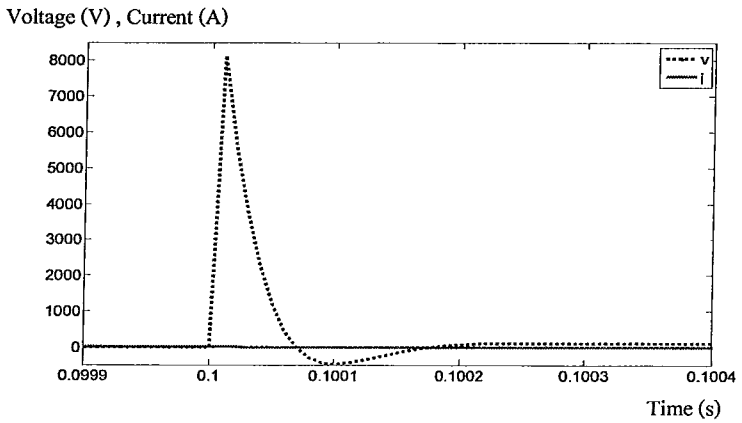
(ข) สภาวะนำกระแส

รูปที่ 2.38 ทดสอบการนำกระแสและหยุดนำกระแสของไอจีบีที กับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่โหลด R

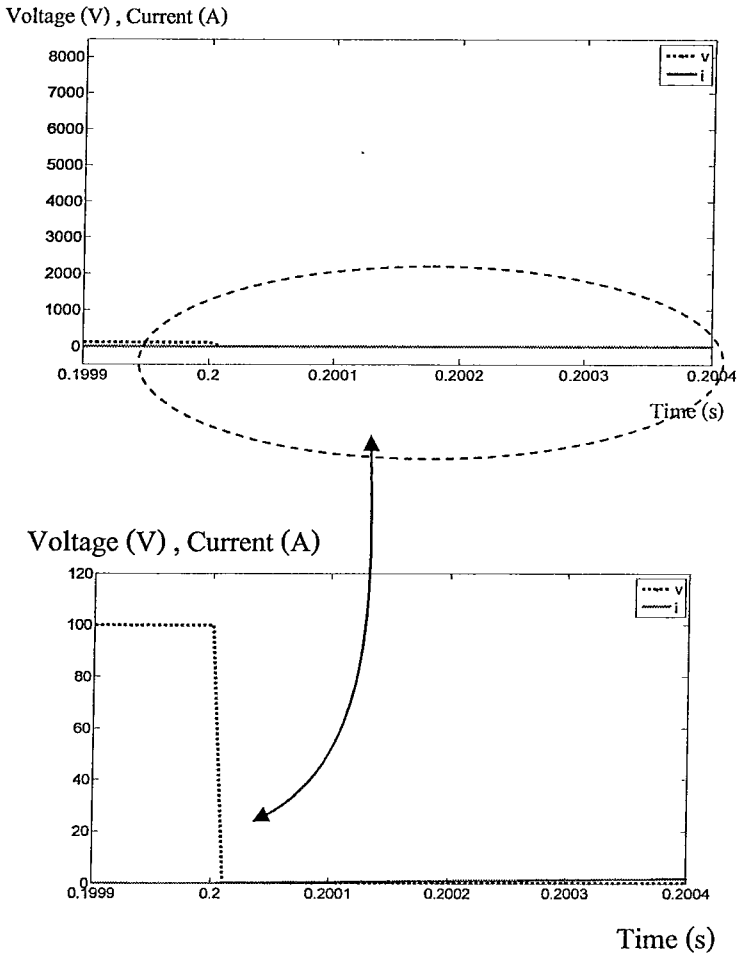
จากรูปที่ 2.38 แสดงรูปคลื่นของ แรงดัน กระแส ขณะที่ไอจีบีทีหยุดนำกระแส ที่เวลา 0.1 วินาที และเริ่มนำกระแสที่ 0.2 วินาที ที่โหลด R

การจำลองสภาวะนำกระแส และหยุดนำกระแสของไอจีบีที เมื่อต่อกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ที่โหลด RL





(ก) สภาวะหยุดนำกระแส



(ข) สภาวะนำกระแส

รูปที่ 2.39 ทดสอบการนำกระแสและหยุดนำกระแสของไอจีบีที กับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่โหลด R L

จากรูปที่ 2.39 แสดงรูปคลื่นของ แรงดัน กระแส ขณะที่ ไอจีบีที หยุดนำกระแส ที่เวลา 0.1 วินาที และเริ่มนำกระแสที่ 0.2 วินาที ที่โหลด RL

2.6 การป้องกันแรงดันเกิน

การเกิดแรงดัน และกระแสเกินส่งผลกระทบต่อฉนวนป้องกันอุปกรณ์ หรือเกิดความเสียหายต่อตัวอุปกรณ์ และในปัจจุบันมีการนำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มาใช้อย่างแพร่หลาย เช่น อุปกรณ์คอมพิวเตอร์สื่อสาร หรืออุปกรณ์ที่ใช้สำหรับควบคุมเครื่องจักรในระบบกระบวนการผลิต การเกิดปัญหาอุปกรณ์ ชำรุดเสียหายบ่อยครั้ง ในขณะมีเหตุการณ์ฝนตกฟ้าผ่าหรือเกิดความผิดพร่องในระบบไฟฟ้า เป็นสาเหตุของแรงดันไฟฟ้าเกิน เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ามากกว่าที่อุปกรณ์จะสามารถทนได้ ดังนั้นการป้องกันอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ควรต้องมีอุปกรณ์ป้องกันแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเกิน Surge Protection Device หมายถึง อุปกรณ์ป้องกันไฟกระชากแรงดันสูงชั่วขณะ เป็นอุปกรณ์ที่ช่วยลดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่สูงขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาสั้นๆ ได้ .

สาเหตุ

1. ปรากฏการณ์ธรรมชาติ เช่น ฝนตกฟ้าคะนอง, พายุ, ฟ้าผ่า และแผ่นดินไหว
2. เกิดความผิดปกติของระบบจ่ายพลังงานไฟฟ้า
3. การเปิด-ปิดสวิตช์อุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีมอเตอร์ใช้พลังงานไฟฟ้ามาก
4. ความต้องการพลังงานไฟฟ้าที่มากเกิน
5. สัญญาณรบกวนทางไฟฟ้า

2.6.1 การเกิดแรงดันสูงชั่วขณะ และไฟเกิน

เป็นสภาวะที่แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าสูงขึ้นในระยะเวลาสั้นๆ ซึ่งเกิดขึ้นในวงจรไฟฟ้า โดยมีค่าแรงดันไฟฟ้าสูงกว่า 2,000 โวลต์และกระแสไฟฟ้าสูงกว่า 100 แอมแปร์ เกิดขึ้นในระยะเวลาประมาณ 1-10 ไมโครวินาที ผลกระทบจากปัญหาทางไฟฟ้าเหล่านี้สร้างความเสียหายได้อย่างมากมาย ไม่ว่าจะเป็น ทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าหรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิคส์ชำรุดเสียหาย, ระบบหยุดทำงาน, ทำให้สูญเสียข้อมูล, เวลา เป็นต้น หลักการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันไฟกระชากแรงดันสูงชั่วขณะ ออกแบบให้สามารถเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้นในช่วงเวลาอันสั้นออกจากอุปกรณ์ไฟฟ้า โดยสร้างแนวที่มีความต้านทานต่ำเชื่อมต่อไปสู่ตำแหน่งของสายดิน เพื่อให้แรงดันที่สูงขึ้นชั่วขณะไหลไปตามแนวความต้านทานต่ำไปยังสายดิน [22]

2.6.2 คุณลักษณะตามมาตรฐาน

อุปกรณ์ที่ใช้ป้องกันแรงดันเกิน เป็นได้ทั้งเสิร์จและสวิตชิ่ง ใช้กับอุปกรณ์ได้แก่ หม้อแปลงไฟฟ้า เครื่องจักรกลไฟฟ้า รีแอกเตอร์ กับดักเสิร์จจะต่อคร่อมอยู่กับตัวอุปกรณ์ คือ ต่ออยู่ระหว่างเฟสกับดิน ตัวกับดักเสิร์จประกอบด้วยความต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้น

ตารางที่ 2.5 ค่าแรงดัน Let Through Voltage ตามมาตรฐาน UL1449 Listed [23]

แรงดันของระบบไฟฟ้า	พิกัดแรงดันเสิร์จ
120/208 หรือ 277/480 โวลท์	400 โวลท์
208,240,277,230/400 หรือ 277/480 โวลท์	800 โวลท์
347,หรือ 347/600 โวลท์	1200 โวลท์
480 โวลท์	1500 โวลท์
600 โวลท์	2000 โวลท์

2.6.3 การนำไปใช้งาน

เสิร์จเป็น MOV (Metal Oxide Varistor) จะมีการตอบสนองต่อแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่สูงขึ้นในช่วงเวลาสั้นได้เร็วประมาณ 20 นาโนวินาที แต่ถ้ารับกระแสไฟฟ้าสูงเข้ามาจะทำให้อายุการใช้งานของอุปกรณ์ลดลง ภายใต้สภาวะปกติ MOV มีความต้านทานสูง แต่เมื่อมีการรับแรงดันไฟฟ้าสูงเข้ามา ความต้านทานของ MOV จะลดต่ำลงอย่างรวดเร็ว เพื่อสร้างแนวที่มีความต้านทานต่ำสำหรับให้แรงดันไฟฟ้าสูงไหลไปสู่สายดิน นอกจากนี้ MOV ยังมีความสามารถในการควบคุมแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าอีกด้วย

จากสมการ

$$\frac{V}{V_{ref}} = k_i \left(\frac{I}{I_{ref}} \right)^{1/\alpha_i} \tag{2.25}$$

เมื่อ

V คือ แรงดันไฟฟ้าในวงจร หน่วย โวลท์

V_{ref} คือ แรงดันที่เสิร์จสามารถป้องกันวงจรได้

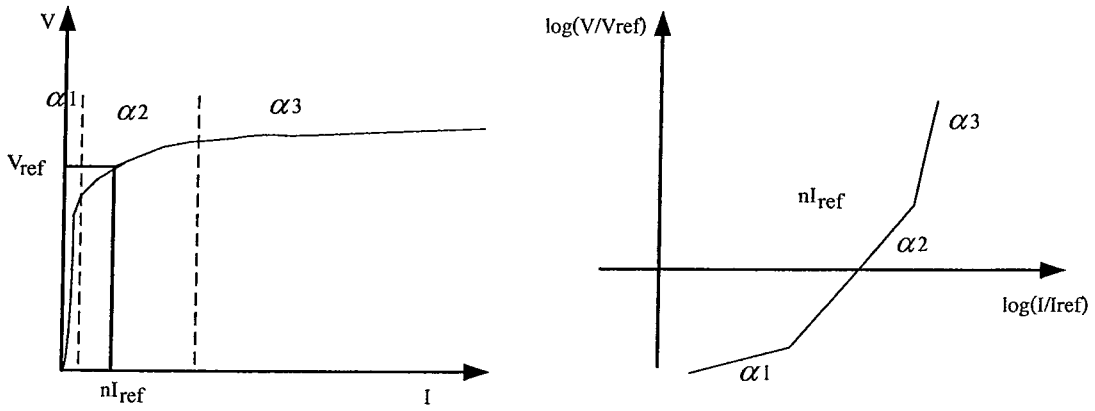
k_i คือ ค่าคงที่ของสารที่นำมาผลิต MOV กำหนดโดยบริษัทผู้ผลิต

I คือ กระแสไฟฟ้าในวงจร หน่วย แอมป์

I_{ref} คือ กระแสที่เสิร์จสามารถป้องกันวงจรได้

α_i คือ ค่า α ของเสิร์จ (ตามจำนวนตัวที่ต่อในระบบ)

การนำไปใช้งานโดยการต่อขนานเข้ากับวงจร จากคุณลักษณะแปรผันผกผันกันของแรงดันกับกระแสไฟฟ้า



(ก) เปรียบเทียบแบบสเกลตรง (ข) เปรียบเทียบแบบล็อกกาลิทึม

รูปที่ 2.40 การเปรียบเทียบของ กระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า

2.7 โปรแกรม LabVIEW

งานวิจัยนี้ใช้เครื่องมือ LabVIEW เป็นหลักในการเขียนโปรแกรมในส่วนตรวจจับ และแสดงผลที่หน้าจอคอมพิวเตอร์ ใช้แสดงผลของรูปคลื่นของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าแบบเสมือนจริง กราฟแสดงผลรูปคลื่นสัญญาณจากเครื่องมือตรวจจับสัญญาณไฟฟ้า เรียกว่า ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) หลักการดังกล่าวแบ่งออกเป็น 3 ส่วนใหญ่ ๆ คือ

1. ส่วนรับข้อมูลและควบคุมอินพุต (Acquisitions And Controls Unit) ส่วนนี้เป็น ส่วนที่นำข้อมูลจากภายนอกเข้าสู่ระบบคอมพิวเตอร์ โดยที่ข้อมูลที่เข้าสู่ระบบนี้อาจมา จากการ์ดดีเอคิว (DAQ Card) สำหรับรับข้อมูลที่เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า, การ์ดไอเอ็มเอคิว (IMAQ Card) สำหรับรับข้อมูลประเภทรูป หรือจากเครื่องมือวัดทั่วไปทางจีพีไอบีบัส (GPIB Bus)

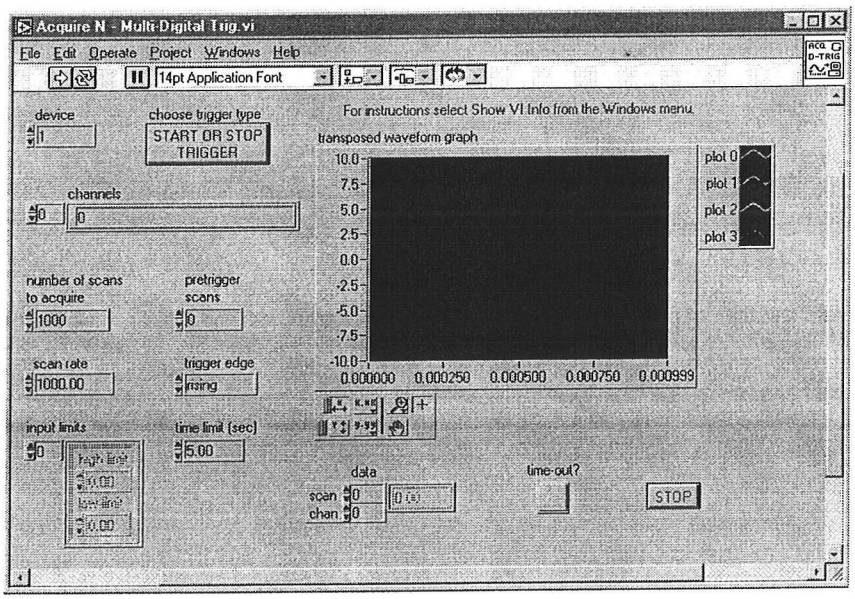
2. ส่วนวิเคราะห์ข้อมูล (Analysis Unit) เมื่อรับข้อมูลแล้ว จะต้องผ่านส่วนนี้ เพื่อที่จะทำให้ข้อมูลไปแสดงผลในรูปที่สื่อความหมายในสิ่งที่ผู้ใช้งานสามารถนำไปแสดงแทนสื่อ ที่วัดและใช้งาน

3. ส่วนแสดงผล (Presentation) เป็นการแสดงผลในรูปแบบที่เข้าใจง่ายและเป็น ประโยชน์ต่อผู้ใช้งาน เช่น ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ สโคป ฯลฯ

2.8.1 ลักษณะที่ปรากฏทางจอภาพ

เหมือนกับเครื่องมือหรืออุปกรณ์ทางวิศวกรรม ในการทำงานของ ฟังก์ชัน, Subroutines และโปรแกรมหลักเหมือนกับภาษาทั่วไป สำหรับ VI ประกอบ ด้วยส่วนประกอบที่สำคัญสามส่วนคือ

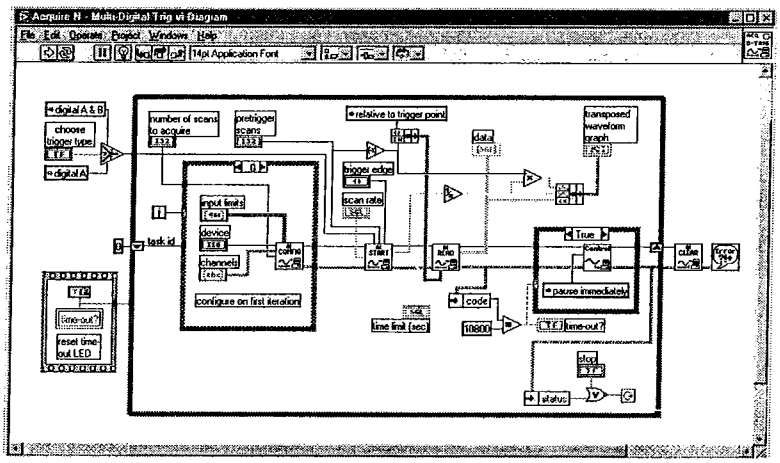
1. Front Panel หรือหน้าปัทม์ เป็นส่วนที่ใช้สื่อความกันระหว่างผู้ใช้กับโปรแกรม (user interface) โดยทั่วไปจะมีลักษณะเหมือนกับหน้าปัทม์ของเครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่ใช้งานด้านการวัดทั่วๆ ไป โดยทั่วไปจะประกอบด้วย สวิตซ์ปิดเปิด, ปุ่มบิด, ปุ่มกด จอแสดงผลค่าที่ผู้ใช้สามารถกำหนด ดังนั้นจะคล้ายกับการเขียนโปรแกรมประเภท Visual ทั้งหลายคงจะเข้าใจถ้าหากบอกว่า Front Panel นี้จะเปรียบเสมือนเป็น GUI ของโปรแกรมหรือ VI นั่นเอง ลักษณะของ Front Panel แสดงในรูปต่อไปนี้



รูปที่ 2.41 Front Panel ของโปรแกรม LabVIEW

2. Block Diagramเป็นเสมือนกับ Source Code หรือโปรแกรมของ LabVIEW ปรากฏอยู่ในรูปของภาษา G ซึ่ง Block Diagram ถือว่าเป็น Executable Program คือสามารถที่จะทำงานได้ทันที ข้อดีของ LabVIEW คือมีการตรวจสอบความผิดพลาดของโปรแกรมตลอดเวลา ทำให้ผู้เขียนโปรแกรมรู้ข้อผิดพลาดในโปรแกรมและสามารถดูรายละเอียดของความผิดพลาดที่แสดงให้เห็นได้ตลอดเวลา ส่วนประกอบภายใน Block Diagram ประกอบด้วย ฟังก์ชัน ค่าคงที่

โปรแกรมควบคุมการทำงานโครงสร้าง จากนั้นในแต่ละส่วนรูปของ Block จะต่อสาย (wire) สำหรับ Block ที่เหมาะสมเข้าด้วยกัน เพื่อกำหนดลักษณะการไหลของข้อมูลระหว่าง block ทำให้ข้อมูลได้รับการประมวลผลตามที่ต้องการ และแสดงผลให้แก่ผู้ใช้ต่อไป



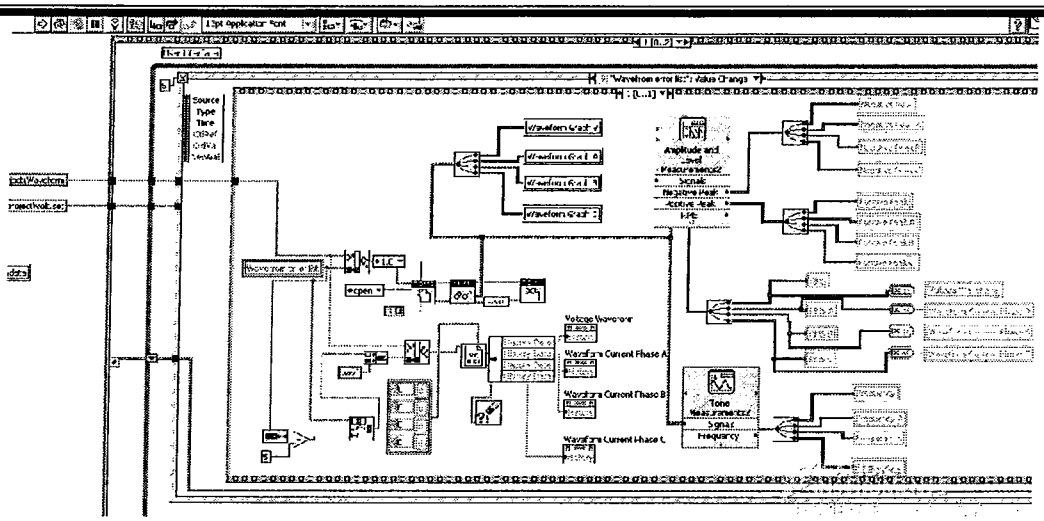
รูปที่ 2.42 . Block Diagramเป็นเสมือนกับ Source Code ของโปรแกรม LabVIEW

3. Icon และ Connector เปรียบเสมือนโปรแกรมย่อย Subroutine ในโปรแกรมปกติทั่วๆ ไปโดย icon หมายถึง block diagram ตัวหนึ่งที่มีการส่งข้อมูลเข้าและออกผ่านทาง Connector เรียก Subroutine ว่า subVI ข้อดีของการเขียนโปรแกรมด้วยภาษา G คือสามารถสร้าง VI ทีละส่วนขึ้นมาให้ทำงานด้วยตัวเองอย่างอิสระ จากนั้นในภายหลักถ้าต้องการเขียนโปรแกรมอื่นเพิ่มได้เพื่อซึ่งทำให้ VI ที่เขียนขึ้นก่อนกลายเป็น subVI การเขียนในลักษณะนี้เรียกว่า เขียนเป็น module

สำหรับลักษณะทั่วไปของ Icon และ Connector จะแสดงในรูป จะเห็นว่าเมื่อแสดงในรูปของ Connector จะพบว่ามีช่องต่อข้อมูลหรือที่เรียกว่า Terminal ปรากฏ

2.8.2 หลักการการไหลของข้อมูล (Dataflow Programming Fundamental)

หลักการการไหลของข้อมูล เป็นรูปแบบการทำงานที่ขึ้นอยู่กับการไหลของข้อมูลระหว่าง บล็อกฟังก์ชั่นต่างๆ ในลักษณะที่ทำงานพร้อมกัน ทิศทางของการไหลถูกกำหนดด้วยเส้นเชื่อม เพื่อผ่านไปดังจุดต่างๆผ่านการประเมินผลและคำนวณ และแสดงผลลักษณะของการไหลของ ข้อมูลของภาษาโปรแกรมของรูปภาพ เหมือนกับบล็อกไดอาแกรม ซอฟต์แวร์ให้ความสนใจการเคลื่อนที่ และเปลี่ยนแปลงข้อมูลเหมือนมองเห็นจากข้างในของเครื่องมือวัดจริง



รูปที่ 2.43 รูปแบบการทำงานของซอฟต์แวร์ที่ใช้หลักการการไหลของข้อมูล

สรุปท้ายบท

จากการศึกษาวรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อให้ได้แนวทาง ทฤษฎีสำหรับการออกแบบควบคุมการทำงานและสภาวะตัด ต่อวงจรของเซอร์กิตเบรกเกอร์ จึงต้องศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลแรงดันไฟฟ้าแบบสมมาตร ไม่สมมาตร กระแสเกินและกระแสไฟฟ้าลัดวงจร ศึกษาการ ตัด-ต่อวงจรไฟฟ้าของเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันต่ำ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังการวิเคราะห์และการเลือกอุปกรณ์มาใช้งาน และอุปกรณ์ป้องกันไฟฟ้าเกินสำหรับSSCB