บทที่ 2

แรงดันเกินสวิตชิง

การศึกษาและวิเคราะห์แรงดันเกินสวิตชิงที่เกิดขึ้นจากการจ่ายไฟฟ้าและจ่ายไฟฟ้าซ้ำให้กับระบบสายเคเบิลแรงสูง เพื่อหาวิธีการป้องกันที่เหมาะสมจำเป็นต้องมีความเข้าใจในทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของแรงดันเกินชั่วครู่ แรงดันเกินสวิตชิง ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดแรงดันเกินสวิตชิง ระบบสายเคเบิลแรงสูง เซอร์กิตเบรกเกอร์ รวมถึงวิธีการป้องกันและแก้ปัญหาแรงดันเกินสวิตชิงที่เกิดขึ้น

2.1 แรงดันเกินชั่วครู่

ภาวะชั่วครู่ทางไฟฟ้า (Electrical Transient) หมายถึงการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันหรือกระแสไฟฟ้าอยู่ในช่วงหลายสิบถึงหลายพันไมโครวินาที โดยการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันหรือกระแสไฟฟ้าที่มีค่าสูงมาก ๆ สามารถทำให้การฉนวนของระบบไฟฟ้าเสียหาย เนื่องจากอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบจะได้รับความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่าความคงทนของไดอิเล็กทริก (Dielectric Strength) ที่ออกแบบไว้ โดยความรุนแรงจะขึ้นอยู่กับ

- ขนาดของแรงดันเกิน (Voltage Magnitude)
- ช่วงเวลาของการเกิดแรงดันเกิน (Time Duration)
- รูปคลื่นของแรงดันเกิน (Wave Shape)
- ความบ่อยครั้งของการเกิดแรงดันเกิน (Frequency of Occurrence)
- ผลกระทบที่เกิดขึ้นกับฉนวนที่เป็นของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซ

ขนาดของแรงดันเกิน จะเป็นการเทียบขนาดของแรงดันเกินที่เกิดขึ้น เป็นจำนวนเท่าของ แรงดันเฟสค่ายอด (Phase Voltage Magnitude: U_{ph}) ของระบบไฟฟ้า ดังแสดงในสมการที่ 2.1 [1]

$$U_{ph} = U_{LL} \times \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 1.0 \text{ pu} \qquad (2.1)$$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

การใช้แรงดันเฟสค่ายอด เป็นตัวเทียบเนื่องจากสายไฟหรืออุปกรณ์ที่ใช้ในระบบ มีการติดตั้งเพื่อรับแรงดันระหว่างเฟสกับดินหรือแรงดันเฟสนั่นเอง การวัดแรงดันเกิน เช่น แรงดันเกินฟ้าผ่า จะเป็นการวัดค่ายอด รวมถึงการฉนวนภายนอกของอุปกรณ์หรือการฉนวนสายพาดในอากาศจะมีอากาศเป็นฉนวน การเบรกดาวน์ของอากาศจะเกิดขึ้นที่ค่ายอดสูงสุดของรูปคลื่นแรงดัน

แรงดันเกินชั่วครู่ (Transient Overvoltage) สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทตามลักษณะของการเกิดแรงดันเกินในระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งประกอบด้วยแรงดันเกินภายนอก (External Overvoltage) และแรงดันเกินภายใน (Internal Overvoltage)

2.1.1 แรงดันเกินภายนอก

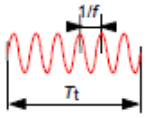
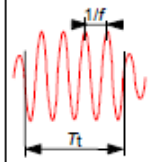
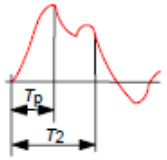
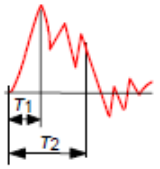
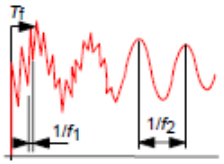
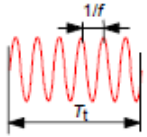
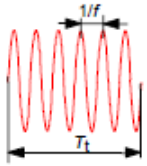
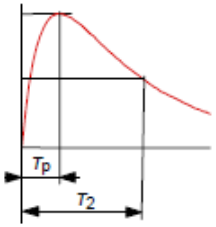
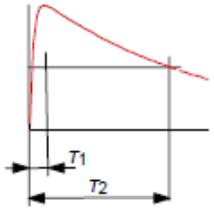
แรงดันเกินภายนอก มีต้นกำเนิดมาจากภายนอกของระบบไฟฟ้า ขนาดของแรงดันเกินไม่ได้ขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้าของระบบ ตัวอย่างของแรงดันเกินภายนอกอาจจะเกิดขึ้นจากแรงดันเกินเนื่องจากฟ้าผ่า (Lightning Overvoltage) ซึ่งเกิดจากปรากฏการณ์ฟ้าผ่าที่ทำให้กระแสฟ้าผ่าไหลลงสู่ระบบไฟฟ้าแล้วทำให้เกิดเป็นแรงดันเกินที่มีความถี่สูงและระยะเวลาในการเกิดสั้นมาก

2.1.2 แรงดันเกินภายใน

แรงดันเกินภายใน มีต้นกำเนิดมาจากการทำงานภายในของระบบไฟฟ้าซึ่งอาจจะเกิดจากการทำงานในสภาวะปกติ เช่น การเปิด-ปิดวงจร หรือเกิดจากการทำงานที่ผิดปกติ เช่น เกิดความผิดพร่อง (Fault) ขึ้นในระบบ โดยขนาดของแรงดันเกินที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบ ตัวอย่างเช่น แรงดันเกินชั่วคราว (Temporary Overvoltage) คือแรงดันเกินที่มีความถี่ใกล้เคียงกับความถี่ของระบบไฟฟ้า และแรงดันเกินสวิตชิง (Switching Overvoltage) คือแรงดันเกินที่เกิดขึ้นจากการเปิด-ปิดวงจรของระบบโดยใช้อุปกรณ์ตัด-ต่อไฟฟ้า เช่น เซอร์กิตเบรกเกอร์ (Circuit Breaker) เป็นต้น

แรงดันเกินชั่วครู่ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าจะมีลักษณะที่แตกต่างกัน ทั้งนี้หากแบ่งตามความถี่และลักษณะรูปคลื่นของแรงดันสามารถแบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม ดังแสดงในภาพที่ 2.1 และตารางที่ 2.1 [5]

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

Class	Low frequency		Transient		
	Continuous	Temporary	Slow-front	Fast-front	Very-fast-front
Voltage or over-voltage shapes					
Range of voltage or over-voltage shapes	f = 50 Hz or 60 Hz T_t ≥3 600s	10 Hz < f < 500 Hz 0,02 s ≤ T_t ≤ 3 600 s	20 µs < T_p ≤ 5 000 µs T_2 ≤ 20 ms	0,1 µs < T_1 ≤ 20 µs T_2 ≤ 300 µs	T_f ≤ 100 ns 0,3 MHz < f_1 < 100 MHz 30 kHz < f_2 < 300 kHz
Standard voltage shapes	 f = 50 Hz or 60 Hz T_t [a]	 48 Hz ≤ f ≤ 62 Hz T_t = 60 s	 T_p = 250 µs T_2 = 2 500 µs	 T_1 = 1,2 µs T_2 = 50 µs	[a]
Standard withstand voltage test	[a]	Short-duration power frequency test	Switching impulse test	Lightning impulse test	[a]

All rights reserved

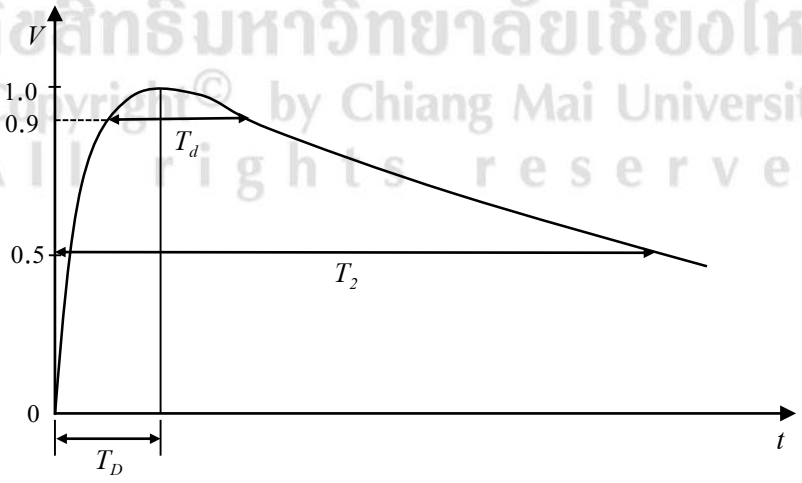
ภาพที่ 2.1 การแบ่งประเภทและลักษณะรูปคลื่นของแรงดันเกิน [2]

ตารางที่ 2.1 การแบ่งประเภทของแรงดันเกินชั่วครู่

กลุ่ม	ช่วงความถี่	ลักษณะรูปคลื่น	ชื่อเรียก
1	0.1 Hz – 3 kHz	การแกว่งด้วยความถี่ต่ำ	แรงดันเกินชั่วคราว
2	50/60 Hz – 20 kHz	เสิร์จที่มีการเปลี่ยนแปลงช่วงหน้าคลื่นช้า	แรงดันเกินสวิตชิง
3	10 kHz – 3 MHz	เสิร์จที่มีการเปลี่ยนแปลงช่วงหน้าคลื่นเร็ว	แรงดันเกินฟ้าผ่า
4	100 kHz – 50 MHz	เสิร์จที่มีการเปลี่ยนแปลงช่วงหน้าคลื่นเร็วมาก	แรงดันเกินหลังจากตัดวงจร

2.2 แรงดันเกินสวิตชิง

ภาวะชั่วครู่ของแรงดันเกินในวงจรไฟฟ้าที่เกิดจากกระบวนการสวิตชิงหรืออาจเกิดจากความผิดพร่องในระบบไฟฟ้าที่เป็นเหตุให้อุปกรณ์ปลด-สับวงจรและอุปกรณ์ป้องกัน (Protective Device) ทำงาน ทำให้วงจรไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กอย่างทันทีทันใดในระบบไฟฟ้าที่มีองค์ประกอบพื้นฐานซึ่งประกอบด้วยค่าความต้านทาน ค่าความเหนี่ยวนำและค่าความจุไฟฟ้า ส่งผลทำให้แรงดันไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงในรูปแบบของคลื่นสัญญาณเสิร์จ (Surge) หรือ อิมพัลส์ (Impulse) ดังแสดงในภาพที่ 2.2 ที่มีขนาดของแรงดันไฟฟ้าอยู่ในช่วง 2.0 – 4.0 pu และมีความถี่สัญญาณอยู่ในช่วง 50 Hz – 20 kHz



ภาพที่ 2.2 อิมพัลส์สวิตชิงรูปคลื่นมาตรฐาน

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

แรงดันเกินสวิตชิงสามารถเกิดขึ้นได้ในทุกระดับแรงดัน แต่เนื่องจากขนาดของแรงดันเกินที่มีค่าขึ้นอยู่กับจำนวนเท่าของระดับแรงดันของระบบ ทำให้ในระบบไฟฟ้าแรงต่ำ ระดับของฉนวนของอุปกรณ์ต่าง ๆ สามารถทนต่อแรงดันเกินสวิตชิงที่เกิดขึ้นได้ แต่ในกรณีของระบบไฟฟ้าแรงสูง แรงดันเกินสวิตชิงอาจสูงกว่าระดับของฉนวนของอุปกรณ์ จึงเป็นเหตุให้แรงดันเกินสวิตชิงส่งผลกระทบและก่อให้เกิดปัญหาอย่างมากในระบบไฟฟ้าแรงสูงโดยเฉพาะระดับแรงดันไฟฟ้าที่สูงกว่า 245 kV ขึ้นไป [2]

จากการเพิ่มขึ้นของระดับแรงดันที่ใช้ในระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าทำให้การออกแบบการฉนวนต้องคำนึงถึงผลของแรงดันเกินสวิตชิงเป็นหลักด้วยเหตุผลที่สำคัญคือ ขนาดของแรงดันเกินจะขึ้นอยู่กับระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบ (Nominal System Voltage) และค่าความคงทนต่อการเบรกดาวน์ (Breakdown Strength) ของฉนวนภายนอกซึ่งจะมีค่าต่ำสุดภายใต้เสิร์จไฟฟ้าที่มีช่วงหน้าคลื่น 50 – 500 μs ซึ่งอยู่ในช่วงของการเกิดแรงดันเกินสวิตชิง

สาเหตุที่ทำให้เกิดแรงดันเกินสวิตชิงในระบบไฟฟ้า อาจเกิดจากการจ่ายไฟฟ้าหรือไม่จ่ายไฟฟ้าให้กับสายส่งหรือหม้อแปลงไฟฟ้า การปิดซ้ำของเซอร์กิตเบรกเกอร์ (Circuit Breaker Reclosing) เพื่อจ่ายไฟฟ้าซ้ำ ให้กับระบบภายหลังจากการแก้ปัญหาผิดพร่องในระบบ (Fault Clearing) รวมถึงการปลดโหลด (Load Rejection) เป็นต้น แต่สาเหตุหลักที่สำคัญมักจะเกิดจากการปลด-สับวงจรในระบบสายส่งแรงสูงรวมไปถึงระบบสายส่งเคเบิลแรงสูงใต้ดินและเคเบิลแรงสูงใต้น้ำ เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงพลังงานที่เก็บสะสมอยู่ในรูปของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากค่าความจุไฟฟ้าของสายส่งและเคเบิลอย่างทันทีทันใด ส่งผลทำให้เกิดการแกว่งของแรงดันไฟฟ้า และเกิดเป็นแรงดันเกินชั่วครู่ที่มีลักษณะเป็นเสิร์จ

2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อแรงดันเกินสวิตชิง

แรงดันเกินสวิตชิงที่เกิดจากการเปิด-ปิด วงจรไฟฟ้าจะมีลักษณะและขนาดที่แตกต่างกัน เนื่องจากสถานะเริ่มต้นของวงจรไฟฟ้าและการทำงานของอุปกรณ์ปลด-สับวงจรในระบบ ซึ่งในที่นี้หมายถึงเซอร์กิตเบรกเกอร์ [25] โดยสามารถอธิบายแยกออกเป็น 2 กรณีที่สำคัญได้ดังนี้

- การเปิดวงจรไฟฟ้า (Open Circuit) หรือการไม่จ่ายไฟฟ้า ในขณะที่เซอร์กิตเบรกเกอร์ทำการเปิดวงจร หน้าสัมผัสของเซอร์กิตเบรกเกอร์อาจแยกออกจากกันที่ตำแหน่งของเวลาหรือตำแหน่งบนรูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายที่ตำแหน่งใดก็ได้ ขึ้นอยู่กับการสั่งการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์ แต่ระบบไฟฟ้าจะถูกเปิดวงจรออกอย่างสมบูรณ์ที่ตำแหน่งเวลาหรือรูปคลื่นสัญญาณที่กระแสมีค่าเป็นศูนย์ หรือเมื่อไม่มีกระแส

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ไหลผ่านเซอร์กิตเบรกเกอร์ เนื่องจากขณะที่หน้าสัมผัสของเซอร์กิตเบรกเกอร์ถูกแยกออกจากกันจะยังคงมีกระแสอาร์กไหลผ่านหน้าสัมผัสอยู่ ส่งผลทำให้วงจรไฟฟ้ายังได้รับการจ่ายไฟอยู่เช่นกัน แต่เมื่อกระแสอาร์กดับลงและกระแสไฟฟ้าหยุดไหล วงจรไฟฟ้าจะถูกปลดออกไปอย่างสมบูรณ์

ดังนั้นการเปิดวงจรของระบบไฟฟ้าโดยเซอร์กิตเบรกเกอร์จะเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์เมื่อกระแสไฟฟ้าหยุดไหล ซึ่งแรงดันเกินสวิตชิงจากการเปิดวงจรจะมีลักษณะที่คล้ายคลึงกันถึงแม้ว่าเซอร์กิตเบรกเกอร์จะทำงานที่ตำแหน่งเวลาหรือรูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่แตกต่างกัน

- การปิดวงจรไฟฟ้า (Close Circuit) หรือการจ่ายไฟฟ้า ในขณะที่เซอร์กิตเบรกเกอร์ทำการปิดวงจรเพื่อจ่ายไฟให้กับระบบไฟฟ้า หน้าสัมผัสของเซอร์กิตเบรกเกอร์อาจสัมผัสกันที่ตำแหน่งของเวลาหรือตำแหน่งบนรูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ตำแหน่งใดก็ได้ขึ้นอยู่กับคำสั่งปิดวงจร (Closing Command) ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ นอกจากนี้ในกรณีที่เป็นเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบสามเฟส หน้าสัมผัสของเซอร์กิตเบรกเกอร์แต่ละเฟสอาจไม่ได้ทำงานพร้อมกันทั้งสามเฟส เนื่องจากโครงสร้างทางกลทำให้มีช่วงเวลาการทำงานที่แตกต่างกันนับจากเฟสแรกจนถึงเฟสสุดท้ายที่ทำงานครบอย่างสมบูรณ์ ช่วงเวลาที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า ช่วงเวลาในการปิดวงจร (Pole Closing Span) กระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านเซอร์กิตเบรกเกอร์ได้ทันทีที่หน้าสัมผัสทั้งสามเฟสเชื่อมต่อถึงกันอย่างสมบูรณ์ทำให้สถานะเริ่มต้นของระบบไฟฟ้าซึ่งรวมถึงแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมหน้าสัมผัสและประจุไฟฟ้าคงค้าง ในระบบขณะที่เกิดแรงดันเกินสวิตชิง มีลักษณะที่แตกต่างกันในแต่ละตำแหน่งบนรูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและช่วงเวลาในการปิดวงจรอย่างสมบูรณ์

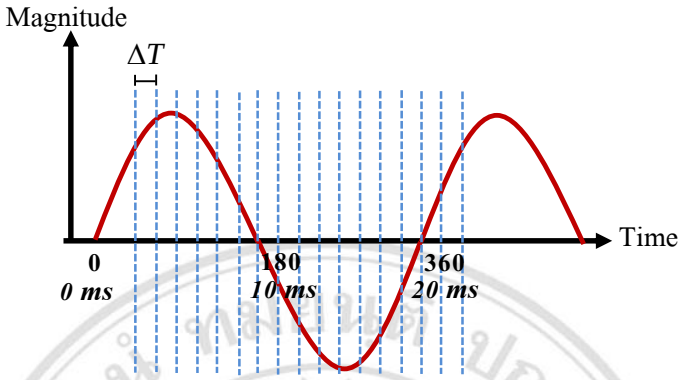
ดังนั้นการปิดวงจรเพื่อจ่ายไฟฟ้าให้กับระบบโดยเซอร์กิตเบรกเกอร์ สามารถก่อให้เกิดแรงดันเกินสวิตชิงที่มีขนาดและรูปคลื่นของแรงดันเกินแตกต่างกันโดยขึ้นอยู่กับปัจจัยหลัก 2 ประการคือ

2.3.1 ตำแหน่งบนรูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้า

ขณะที่เซอร์กิตเบรกเกอร์ทำการปิดวงจรหน้าสัมผัสของเซอร์กิตเบรกเกอร์จะเชื่อมต่อกันอย่างสมบูรณ์ที่ตำแหน่งบนรูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้า ตำแหน่งใดก็ได้ในหนึ่งคาบเวลาของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่เป็นรูปคลื่นไซน์ โดยตำแหน่งบนรูปคลื่นอาจจะกำหนดเป็นมุมในการปิดวงจร (Closing Angle) บนสัญญาณแรงดันไฟฟ้า 0 – 360 องศา

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

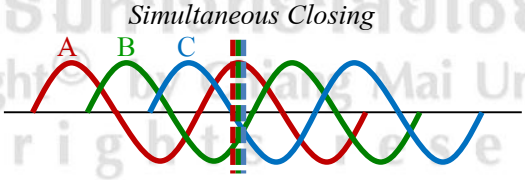
ไฟฟ้า (Electrical Degree) หรือเวลาในการปิดวงจร (Closing Time) บนสัญญาณแรงดันไฟฟ้า 0 – 20 ms ในกรณีที่เป็นสัญญาณความถี่ 50 Hz ดังแสดงในภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 ตำแหน่งบนรูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้า

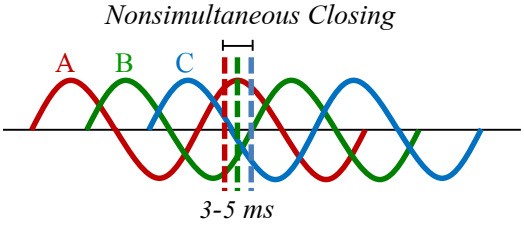
2.3.2 ช่วงเวลาในการปิดวงจร

ขณะที่เซอร์กิตเบรกเกอร์สามเฟสทำการปิดวงจร หน้าสัมผัสของเซอร์กิตเบรกเกอร์แต่ละเฟสอาจไม่ได้ทำงานพร้อมกันทั้งสามเฟส เนื่องจากโครงสร้างทางกลทำให้มีช่วงเวลาการทำงานที่แตกต่างกันนับจากเฟสแรกจนถึงเฟสสุดท้ายที่ทำงานครบอย่างสมบูรณ์ ช่วงเวลาที่อุปกรณ์สวิตซ์ใช้ในการปิดวงจรอย่างสมบูรณ์ทั้งสามเฟสนี้เรียกว่า ช่วงเวลาในการปิดวงจร ทั้งนี้หากหน้าสัมผัสของเซอร์กิตเบรกเกอร์ทั้งสามเฟสทำงานที่เวลาเดียวกันจะเรียกว่า การทำงานพร้อมกัน (Simultaneous Operation) ดังแสดงในภาพที่ 2.4 แต่หากหน้าสัมผัสของเซอร์กิตเบรกเกอร์ทั้งสามเฟสทำงานที่เวลาแตกต่างกันเรียกว่า การทำงานไม่พร้อมกัน (Nonsimultaneous Operation) ดังแสดงในภาพ 2.5



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ภาพที่ 2.4 ช่วงเวลาที่อุปกรณ์สวิตซ์ใช้ในการปิดวงจรอย่างสมบูรณ์ทั้งสามเฟสในเวลาเดียวกัน



ภาพที่ 2.5 ช่วงเวลาที่อุปกรณ์สวิตซ์ใช้ในการปิดวงจรอย่างสมบูรณ์ทั้งสามเฟสในเวลาที่แตกต่างกัน

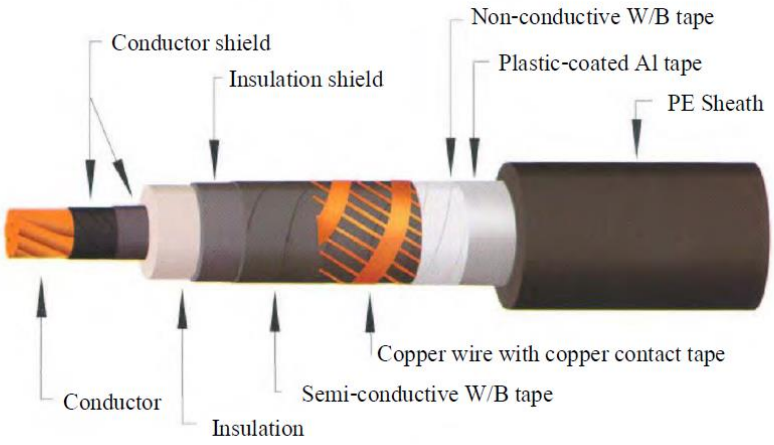
2.4 ระบบสายส่งแรงสูง

ระบบสายส่งแรงสูงที่ใช้ในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า อาจแบ่งได้ตามลักษณะโครงสร้างและการฉนวนได้เป็น 2 แบบ คือ ระบบสายส่งแบบเหนือศีรษะ (Overhead Line System) และระบบสายเคเบิล (Cable System)

- ระบบสายส่งแบบเหนือศีรษะ จะยึดโยงสายตัวนำไว้บนเสาโดยใช้อากาศและลูกถ้วยเป็นฉนวนไฟฟ้าหลักซึ่งมีข้อดี คืออากาศสามารถกลับคืนสภาพความเป็นฉนวนได้เองภายหลังจากเกิดการปล่อยประจุ (Discharge) หรือการเสียสภาพฉับพลัน (Breakdown) การใช้ระบบสายส่งแบบเหนือศีรษะต้องคำนึงถึงปัจจัยภายนอกที่ส่งผลกระทบกับระบบโดยตรง เช่น สภาพแวดล้อม มลภาวะ ความปลอดภัยจากสนามไฟฟ้า และที่สำคัญคือผลกระทบจากปรากฏการณ์ฟ้าผ่า
- ระบบสายเคเบิลจะเป็นระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ใช้สายตัวนำหุ้มด้วยฉนวนของแข็งของเหลว หรือก๊าซอัดความดัน เพื่อให้ทนต่อแรงดันสูงได้โดยความหนาของฉนวนไม่ต้องมากนัก สายเคเบิลถูกนำมาใช้แทนสายส่งแบบเหนือศีรษะ เนื่องจากในบางพื้นที่ต้องการรักษาสภาพแวดล้อมและความสวยงามของภูมิทัศน์ ข้อดีของการใช้สายส่งเคเบิล เช่น ทำให้ดูเรียบร้อย ปลอดภัยจากปรากฏการณ์ฟ้าผ่า และให้ความปลอดภัยสูงแก่คนและสิ่งแวดล้อม

ดังนั้นการใช้สายส่งจ่ายแบบสายเคเบิลจึงถูกนำมาใช้ในระบบไฟฟ้ามากขึ้น เพื่อให้ระบบไฟฟ้ามีความปลอดภัย มั่นคง และความเชื่อถือได้ของระบบสูงขึ้น ซึ่งสายส่งจ่ายแบบสายเคเบิลสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือ สายเคเบิลใต้ดินและสายเคเบิลใต้น้ำ โดยส่วนใหญ่สายเคเบิลที่ใช้งานในหน่วยงานของการไฟฟ้ามีหลายชนิดตามประเภทของฉนวนที่หุ้มตัวนำ เช่น ฉนวนกระดาษ-น้ำมัน ฉนวนกระดาษและก๊าซ และฉนวน Crosslinked Polyethylenen (XLPE) เป็นต้น แต่ที่นิยมใช้ในปัจจุบันคือ สายเคเบิลชนิดฉนวน XLPE [26] ซึ่งจากเดิมสายเคเบิลชนิดฉนวนน้ำมัน สามารถใช้งานได้ดี มีความเชื่อถือได้สูง แต่เนื่องจากปัญหาการติดตั้งจำเป็นต้องใช้พนักงานที่มีประสบการณ์สูงจำนวนมากทำให้ยากต่อการควบคุมและเมื่อเกิดปัญหาน้ำมันรั่ว อาจก่อให้เกิดการลัดวงจรและเกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมได้ ดังนั้น สายเคเบิลชนิดฉนวน XLPE จึงถูกนำมาใช้งานมากขึ้นเนื่องจากการติดตั้ง การใช้งาน และการบำรุงรักษาไม่ยุ่งยาก

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



ภาพที่ 2.6 โครงสร้างสายเคเบิลแรงสูงระดับแรงดัน 115 kV [26]

ภาพที่ 2.7 สายเคเบิลแรงสูงระบบแรงดัน 115 kV [ABB]

2.4.1 โครงสร้างของสายส่งเคเบิลแรงสูงระดับแรงดัน 115 kV ที่ใช้งานในหน่วยงานของการไฟฟ้าจะมีลักษณะและส่วนประกอบ ดังแสดงในภาพที่ 2.6 และ 2.7 โดยมีโครงสร้างที่สำคัญดังนี้

1) ตัวนำ (Conductor) ทำหน้าที่นำกระแสไฟฟ้า ทำจากอะลูมิเนียมหรือทองแดง มีหลายลักษณะดังนี้

1.1 ตัวนำของแข็ง (Solid Conductor) ใช้เป็นตัวนำของสายไฟฟ้าขนาดเล็ก ไม่นิยมใช้ในสายขนาดใหญ่เนื่องจากดัดงอได้ยาก

1.2 ตัวนำตีเกลียว (Round Strand Conductor) ใช้เป็นตัวนำของสายไฟฟ้าทั่วไปและสายเปลือย

1.3 ตัวนำอัดแน่น (Compact Strand Conductor) ใช้เป็นตัวนำของสายไฟฟ้าหุ้มฉนวนทั่วไปโดยการนำตัวนำตีเกลียวมาบีบอัดให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลง เมื่อนำไปใช้ในสายหุ้มฉนวนจะช่วยลดวัสดุที่นำมาหุ้มได้

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2) เปลือกหุ้มตัวนำ (Conductor Screen) ทำจากวัสดุกึ่งตัวนำซึ่งอาจเป็นผ้าอาบคาร์บอน หรือสารสังเคราะห์จำพวกพลาสติกผสมตัวนำ มีหน้าที่ทำให้ผิวสัมผัสของตัวนำกับฉนวนเรียบไม่มีช่องว่างที่มีศักดาไฟฟ้าสูงตกคร่อมซึ่งเป็นสาเหตุของการปล่อยประจุบางส่วน (Partial Discharge)

3) ฉนวน (Insulation) เป็นส่วนที่สำคัญที่สุดของสายเคเบิลมีหน้าที่ป้องกันไม่ให้กระแสไฟฟ้าเกิดการรั่วไหลหรือลัดวงจรจนเกิดความเสียหายต่อระบบไฟฟ้า และอาจเกิดอันตรายต่อบุคคลที่ไปสัมผัสได้

4) เปลือกฉนวน (Insulation Screen) ทำหน้าที่เช่นเดียวกับเปลือกหุ้มตัวนำ คือลดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมบริเวณผิวสัมผัสของฉนวน

5) เปลือกโลหะ (Metallic Screen) ทำหน้าที่เป็นกราวด์ (Ground) สำหรับสายไฟฟ้าแรงสูงและเป็นทางให้กระแสไฟฟ้าไหลกลับในกรณีที่เกิดการลัดวงจร บางครั้งเปลือกโลหะยังทำหน้าที่เป็นการป้องกันแรงทางกล หรือทำหน้าที่เป็นชั้นกันน้ำในกรณีของสายเคเบิลใต้น้ำ

6) ผิวโครงเหล็ก (Amour) เป็นชั้นที่เสริมเพื่อให้สายเคเบิลมีความทนทานต่อแรงทางกลจากภายนอกที่อาจจะทำให้สายเคเบิลชำรุดเสียหาย

7) เทปกันน้ำ (Water Blocking Tape) เป็นส่วนที่เสริมขึ้นมาในกรณีของสายเคเบิลใต้ดินแรงสูงที่ใช้ในบริเวณที่ชื้นแฉะเพื่อป้องกันน้ำไหลเข้าไปตามแนวสายเคเบิลในกรณีที่ผิวหุ้ม (Jacket) ของสายเคเบิลมีการชำรุดจากการลากสายทำให้ส่วนที่เป็นฉนวนสัมผัสกับน้ำเป็นระยะทางยาว

8) ชั้นเคลือบ (Laminated Sheath) เป็นชั้นกันน้ำตามแนวขวางในสายเคเบิลแรงสูงมีลักษณะเป็นเทปโลหะหุ้มด้วยพลาสติกทั้งสองหน้าจากนั้นนำมาห่อรอบเปลือกกราวด์ (Ground Screen) โดยพลาสติกที่ผิวนอกและผิวในของเทปจะถูกทำให้ละลายติดกันเป็นเนื้อเดียวเพื่อป้องกันไม่ให้โมเลกุลของน้ำแพร่ผ่านเข้าไปยังฉนวนได้

9) ผิวหุ้มภายนอก (Jacket) ทำหน้าที่ป้องกันแรงกระแทกเสียดสีต่าง ๆ ขณะติดตั้งสายเคเบิล ส่วนใหญ่ทำจากวัสดุ Polyvinyl (PVC) หรือ Polyethylene (PE)

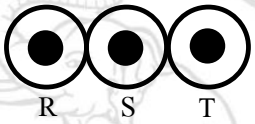
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.4.2 การจัดวางสายเคเบิลใต้ดิน

ในการจัดวางสายเคเบิล สิ่งที่ต้องพิจารณาคือการจัดวางต้องให้มีการเรียงตามความสัมพันธ์เฟส (Phase Relationship) หากการจัดวางสายไม่เป็นไปตามความสัมพันธ์เฟส จะทำให้ค่าความจุไฟฟ้าและค่าความเหนี่ยวนำของเคเบิลแต่ละเส้นมีค่าไม่เท่ากันทำให้การรับกระแสของสายเคเบิลไม่เท่ากัน ยิ่งโหลดมีค่าสูงมาก ๆ กระแสที่ไหลในเคเบิลแต่ละเส้นยิ่งแตกต่างกันมาก การจัดเรียงสายเคเบิลใต้ดินในระบบสามเฟส สามารถจัดเรียงได้ 2 วิธีคือ

1) การจัดวางสายเคเบิลแบบระนาบ

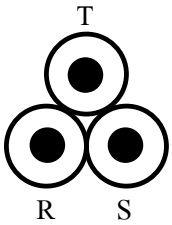
การจัดวางสายเคเบิลแบบระนาบ (Flat Formation) จะเป็นการวางสายเคเบิลทั้งสามเฟสในแนวระนาบเดียวกัน ดังแสดงในภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 การเรียงสายเคเบิลแบบระนาบ

2) การจัดวางสายเคเบิลแบบสามเหลี่ยม

การจัดวางสายเคเบิลแบบสามเหลี่ยม (Trefoil Formation) จะเป็นการวางสายเคเบิลทั้งสามเฟสในรูปสามเหลี่ยม ดังแสดงในภาพที่ 2.9 ซึ่งสามารถใช้ในกรณีที่วางสายเคเบิลแบบแกนเดี่ยวจำนวนสามเฟสหรือเป็นรูปแบบสายเคเบิลแบบสามแกน

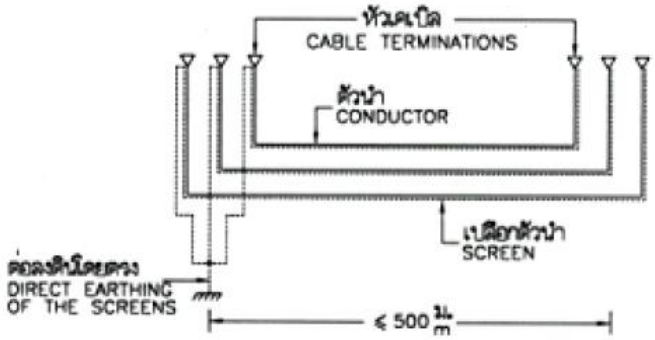


ภาพที่ 2.9 การเรียงสายเคเบิลใต้ดินแบบสามเหลี่ยม

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

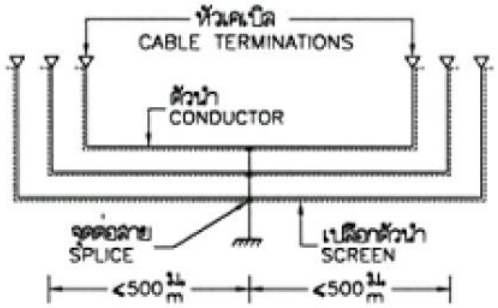
2.4.3 การต่อลงดินสำหรับสายเคเบิลระบบ 115 kV

1) การต่อลงดินข้างเดียว (Single-point Bonding) สำหรับระยะทางไม่เกิน 500 เมตร ดังแสดงในภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 การต่อลงดินข้างเดียว [26]

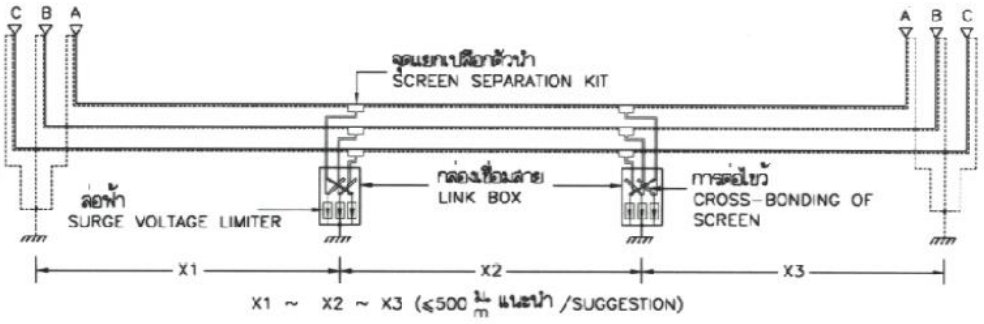
2) การต่อลงดินแบบกึ่งกลาง (Middle-point Bonding) สำหรับระยะทาง 500 – 1000 เมตร ดังแสดงในภาพที่ 2.11



ภาพที่ 2.11 การต่อลงดินแบบกึ่งกลาง [26]

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University

3) การต่อลงดินแบบไขว้ (Cross Bonding) สำหรับระยะทางมากกว่า 1000 เมตร ดังแสดงในภาพที่ 2.12



ภาพที่ 2.12 การต่อลงดินแบบไขว้ [26]

ซึ่งตามทฤษฎี สายเคเบิลระบบ 115 kV ในทุกกรณีไม่ว่าระยะทางจะเป็นเท่าใดก็ตาม ให้ต่อลงดินเป็นลักษณะโผล่ปลายข้างหนึ่งไว้เสมอ ห้ามต่อทั้งสองปลายเคเบิลลงดินอย่างเด็ดขาด เนื่องจากจะมีกระแสไหลวนภายในสายต่อลงดิน (Shield Wire) เมื่อมีกระแสไหลวน จะเกิดความร้อนขึ้นภายในสายเคเบิลและสะสมมากจนสายเคเบิลระเบิดหรือชำรุดได้ [26]

2.5 เซอร์กิตเบรกเกอร์

เซอร์กิตเบรกเกอร์เป็นอุปกรณ์สวิตซ์ทางกลที่ถูกออกแบบมาเพื่อใช้สำหรับเปิด-ปิดวงจรทั้งในขณะที่ระบบไฟฟ้ากำลังอยู่ในสภาวะปกติและสภาวะผิดปกติและเพื่อเปิดวงจรอย่างอัตโนมัติเมื่อกระแสเกินค่าที่ระบุไว้ล่วงหน้าในสภาวะผิดปกติ โดยที่ไม่เกิดความเสียหายแก่ตัวมันเองเมื่อใช้อย่างเหมาะสมภายใต้พิกัดของมัน [27]

โดยปกติเซอร์กิตเบรกเกอร์มีจุดมุ่งหมายให้ทำงานนาน ๆ ครั้ง ถึงแม้ว่าเซอร์กิตเบรกเกอร์บางแบบจะเหมาะสำหรับการทำงานหลายครั้งก็ตาม การเปิดวงจรโดยตัดกระแสที่ไหลในวงจรไฟฟ้าจะกระทำภายในตัวกลางที่ทำหน้าที่เป็นฉนวน เช่น อากาศ, ก๊าซ, น้ำมัน และสุญญากาศ เป็นต้น เพื่อดับอาร์ก (Arc) ที่หน้าสัมผัสของเซอร์กิตเบรกเกอร์ซึ่งจะอยู่ภายในตัวถังที่ทำหน้าที่เป็นกราวด์ ความแตกต่างของเซอร์กิตเบรกเกอร์จะขึ้นอยู่กับชนิดของฉนวนและตัวกลไกในการสั่งการทำงาน เช่น ใช้สปริงร่วมกับลม (Pneumatic) หรือน้ำมันไฮดรอลิก (Hydraulic) เซอร์กิตเบรกเกอร์ที่นิยมใช้ทั่วไปมี 2 ชนิด คือ เซอร์กิตเบรกเกอร์แบบสุญญากาศ (Vacuum Circuit Breaker) และเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบฉนวนก๊าซ SF_6 (SF_6 Circuit Breaker)

2.5.1 เซอร์กิตเบรกเกอร์แบบฉนวนอากาศ

เมื่อหน้าสัมผัสของเซอร์กิตเบรกเกอร์แยกออกจากกันจะทำให้เกิดอาร์กขึ้น ซึ่งอาร์กที่เกิดขึ้นจะประกอบด้วย อิเล็กตรอน ไอออน และส่วนผสมของก๊าซอื่น ๆ รวมเรียกว่าพลาสมา (Plasma) ซึ่งทำให้เกิดการนำไฟฟ้าขึ้นได้ การเกิดอาร์กนี้ทำให้หน้าสัมผัสของเซอร์กิตเบรกเกอร์เสียหายได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องดับอาร์กในเวลาที่เร็วที่สุด

เซอร์กิตเบรกเกอร์แบบฉนวนอากาศเป็นการดับอาร์กด้วยการอัดอากาศที่ความดันสูง คืออากาศที่ความดันสูงมาก ๆ จะมีค่าความคงทนของไดอิเล็กทริกสูง จึงทำให้สามารถดับอาร์กที่หน้าสัมผัสของเซอร์กิตเบรกเกอร์ลงได้

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

เซอร์กิตเบรกเกอร์แบบฉนวนอากาศส่วนมากจะถูกติดตั้งและถูกใช้งานภายในสถานีไฟฟ้าแรงสูง หน้าสัมผัสของเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ทำหน้าที่เป็นตัวตัดกระแส (Interrupter) ดังแสดงในภาพที่ 2.13 จะอยู่ในตัวถังซึ่งไม่มีสิ่งสกปรก ทำให้มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน แต่การผลิตเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบฉนวนอากาศทำได้ยากเพราะหน้าสัมผัสจะเป็นโลหะชนิดพิเศษและไม่สามารถสร้างให้รับแรงดันสูงมาก ๆ ได้

ภาพที่ 2.13 เซอร์กิตเบรกเกอร์แบบฉนวนอากาศ

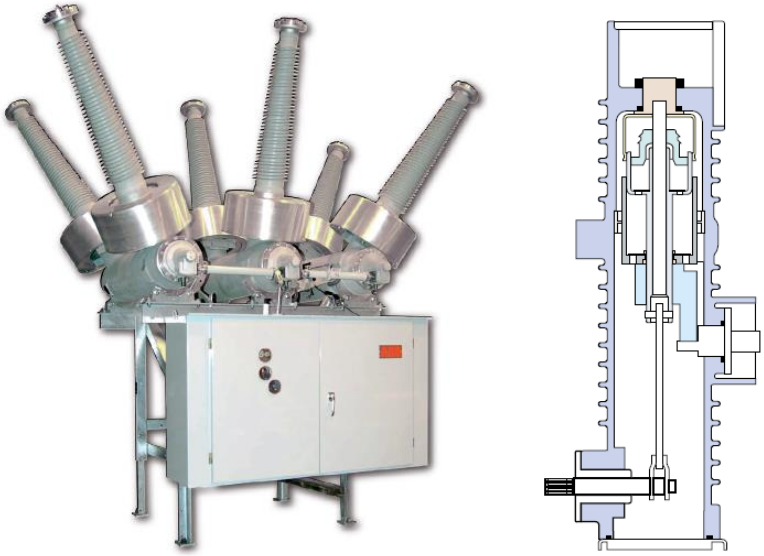
2.5.2 เซอร์กิตเบรกเกอร์แบบฉนวนก๊าซ SF_6

เซอร์กิตเบรกเกอร์ชนิดนี้จะดับอาร์กที่หน้าสัมผัสโดยใช้ก๊าซ SF_6 ซึ่งเป็นก๊าซที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส ไม่ติดไฟ ไม่ช่วยให้ไฟติด และไม่ทำปฏิกิริยากับสารอื่น ทนความร้อนได้สูง มีความหนาแน่นมากกว่าอากาศ และมีความคงทนของไดอิเล็กทริกสูงมาก ก๊าซ SF_6 จะมีค่าแรงดันเสียสภาพฉับพลันสูงมาก เนื่องจากสามารถจับอิเล็กตรอนอิสระในสนามไฟฟ้าได้มาก ทำให้อิเล็กตรอนไปเกาะกับโมเลกุลของก๊าซ SF_6 จึงมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าเป็นไอออนลบที่เคลื่อนที่ได้ช้า เป็นผลทำให้อัตราการเพิ่มขึ้นของอิเล็กตรอนอิสระระหว่างหน้าสัมผัสถูกหน่วงให้ช้าลง ดังนั้นฉนวนก๊าซ SF_6 จึงถูกนำมาใช้เป็นฉนวนของเซอร์กิตเบรกเกอร์

โครงสร้างการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบฉนวนก๊าซ SF_6 เพื่อดับอาร์กจะประกอบด้วย หน้าสัมผัสที่อยู่กับที่ หน้าสัมผัสที่เคลื่อนที่ได้ และห้องดับอาร์ก (Arc Chamber) ดังแสดงในภาพที่ 2.14 เมื่อหน้าสัมผัสของเซอร์กิตเบรกเกอร์มีการแยกตัวออกจากกันจะทำให้ความดันของก๊าซภายในห้องดับอาร์กมีค่าสูงขึ้นและก๊าซ SF_6 ที่มี

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ความดันสูงจะถูกเป่าเข้ามาบริเวณที่เกิดอาร์กระหว่างหน้าสัมผัสทั้งสองเพื่อที่จะดับอาร์กที่เกิดขึ้นได้



ภาพที่ 2.14 เซอร์กิตเบรกเกอร์แบบฉนวนก๊าซ SF_6

เซอร์กิตเบรกเกอร์แบบฉนวนก๊าซ SF_6 สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิดคือ แบบความดันเดี่ยว (Single Pressure) และแบบสองความดัน (Two Pressure)

1) เซอร์กิตเบรกเกอร์แบบความดันเดี่ยว เมื่อหน้าสัมผัสของเซอร์กิตเบรกเกอร์แยกออกจากกัน ก๊าซ SF_6 จะถูกอัดให้มีความดันสูงและถูกเป่ามาที่ลำอาร์กผ่านทางหัวฉีดเพื่อดับอาร์กที่เกิดขึ้นระหว่างหน้าสัมผัสทั้งสองของเซอร์กิตเบรกเกอร์

2) เซอร์กิตเบรกเกอร์แบบสองความดันขณะที่เซอร์กิตเบรกเกอร์ทำงาน ก๊าซ SF_6 จะถูกเป่าไปที่ลำอาร์กโดยการเป่าจะเหมือนกับเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบใช้อากาศดับอาร์ก (Air Blast Circuit Breaker)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ในกลไกการทำงานของระบบมีความแตกต่างกันคือ ช่องการไหลที่ทำให้หน้าสัมผัสเปิดจะมีขนาดเล็กกว่าช่องการไหลที่ทำให้หน้าสัมผัสปิดเพื่อทำให้เป็นก๊าซอัดแรงดัน และช่องการไหลนี้จะทนแรงดันไฟฟ้าได้ดีทำให้ในปัจจุบันเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบฉนวนก๊าซ SF_6 ได้รับความนิยมและใช้งานอย่างแพร่หลายในระบบไฟฟ้าแรงสูง

2.6 แรงดันเกินเนื่องจากการจ่ายไฟฟ้าให้กับสายเคเบิลแรงสูง

2.6.1 แรงดันเกินเนื่องจากการจ่ายไฟฟ้าให้กับสายเคเบิลแรงสูง

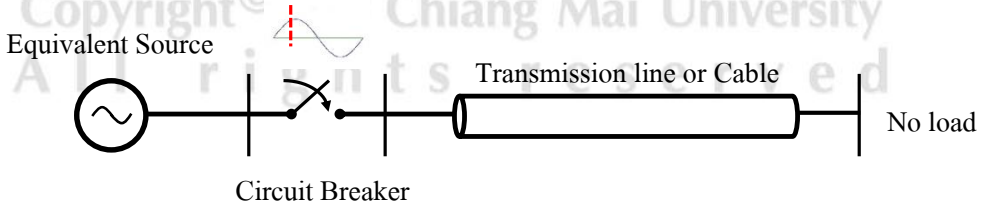
เมื่อเซอร์กิตเบรกเกอร์ทำการปิดวงจรเพื่อการจ่ายไฟฟ้าให้กับระบบไฟฟ้ากำลัง สามารถก่อให้เกิดปัญหาแรงดันเกินสวิตชิงขึ้นได้ เพื่อความปลอดภัยต่อโหลดหรือผู้ใช้ไฟฟ้าที่ต่ออยู่ปลายสาย จึงมีความจำเป็นต้องปลดโหลดออกจากระบบก่อนที่จะทำการจ่ายไฟฟ้าให้กับระบบ การทำงานในลักษณะนี้เรียกว่า การจ่ายไฟฟ้าขณะที่ยังไม่มีโหลด (No-load Energization) ดังแสดงในภาพที่ 2.15

แรงดันเกินสวิตชิงที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งต้นทางสามารถเคลื่อนที่ไปยังปลายทางหรือปลายสายเคเบิลในรูปแบบของคลื่นเคลื่อนที่ (Traveling Wave) โดยในกรณีที่ไม่มีโหลดต่ออยู่ปลายสาย แรงดันไฟฟ้าที่ปลายสาย (Receiving End Voltage: U_R) อาจมีขนาดสูงกว่าแรงดันไฟฟ้าที่ต้นทาง (Sending End Voltage: U_S) ตามหลักการของปรากฏการณ์เฟอรันติ (Ferranti Effect) ดังแสดงในสมการที่ 2.2 และสมการที่ 2.3 ซึ่งเมื่อไม่มีโหลดจะไม่มีกระแสที่จ่ายไปยังปลายสาย (Receiving End Current: I_R) ทำให้แรงดันที่ปลายสายมีค่าสูงกว่าแรงดันที่ต้นทาง ดังแสดงในสมการที่ 2.4 [7]

$$U_S = U_R \cosh \gamma \ell + I_R Z_C \sinh \gamma \ell \tag{2.2}$$

$$I_S = \frac{U_R}{Z_C} \sinh \gamma \ell + I_R \cosh \gamma \ell \tag{2.3}$$

$$\frac{U_S}{U_R} = \cosh \gamma \ell < 1.0 \quad : I_R = 0 \tag{2.4}$$



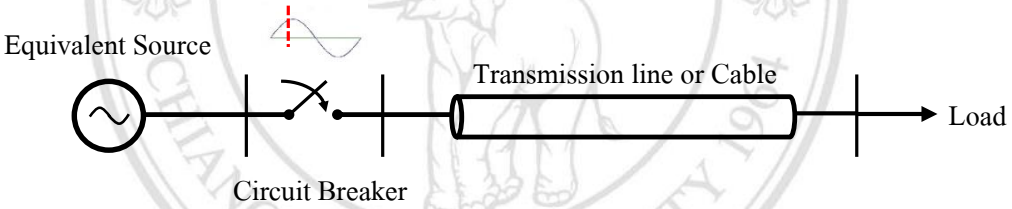
ภาพที่ 2.15 การจ่ายไฟฟ้าให้กับสายเคเบิลแรงสูง

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.6.2 แรงดันเกินเนื่องจากการจ่ายไฟฟ้าซ้ำให้กับสายเคเบิลแรงสูง

การจ่ายไฟฟ้าซ้ำให้กับระบบเกิดขึ้นจากการที่ระบบเดิมกำลังจ่ายไฟฟ้าให้กับโหลดในสภาวะปกติอยู่ แต่ได้เกิดความผิดพร่องแบบชั่วคราว (Temporary Fault) ขึ้นในระบบ ทำให้อุปกรณ์ป้องกันในระบบไฟฟ้าซึ่งหมายถึงเซอร์กิตเบรกเกอร์ทำการปลดวงจรชั่วขณะ แต่เมื่อเหตุผิดพร่องหายไปเซอร์กิตเบรกเกอร์จะทำการปิดวงจรเพื่อจ่ายไฟฟ้าซ้ำให้กับระบบ

การจ่ายไฟฟ้าซ้ำให้กับระบบนี้สามารถก่อให้เกิดแรงดันเกินสวิตชิงขึ้นได้ แต่อาจมีลักษณะและขนาดที่แตกต่างจากการจ่ายไฟฟ้าให้กับระบบในขณะที่ไม่มีโหลด เนื่องจากขณะที่จ่ายไฟฟ้าซ้ำในระบบยังมีโหลดต่ออยู่และสายเคเบิลแรงสูงยังมีประจุไฟฟ้าคงค้าง ซึ่งทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าคงค้าง (Trapped Voltage) เกิดขึ้นอยู่ในสายเคเบิลแรงสูง ส่งผลทำให้เงื่อนไขเริ่มต้นในการเกิดแรงดันเกินสวิตชิงแตกต่างกันออกไป ดังแสดงในภาพที่ 2.16



ภาพที่ 2.16 การจ่ายไฟฟ้าซ้ำให้กับสายเคเบิลแรงสูง

ดังนั้นการศึกษาและวิเคราะห์ปัญหาแรงดันเกินสวิตชิงที่เกิดขึ้นในระบบสายเคเบิลแรงสูงจึงมีความจำเป็นต้องวิเคราะห์แรงดันเกินที่เกิดขึ้นทั้งจากกรณีการจ่ายไฟฟ้าและการจ่ายไฟฟ้าซ้ำให้กับระบบ เนื่องจากการเกิดแรงดันเกินสวิตชิงในแต่ละกรณีจะแตกต่างกันออกไป การวิเคราะห์หาขนาดแรงดันเกินสูงสุดจะมีประโยชน์สำหรับการเลือกวิธีการป้องกันแรงดันเกินที่อาจจะเกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังนั้นได้

2.7 การป้องกันแรงดันเกินสวิตชิง

2.7.1 กับดักเสิร์จ

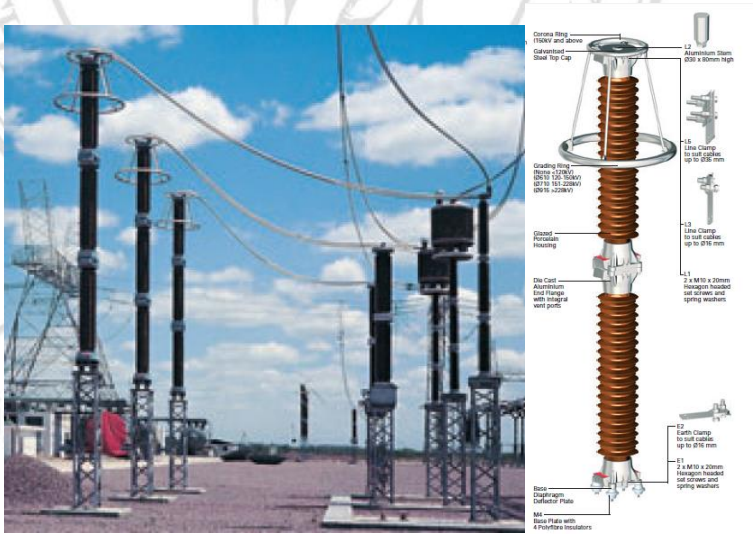
กับดักเสิร์จเป็นอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า ทำหน้าที่จำกัดแรงดันเสิร์จที่กระทำแก่อุปกรณ์และระบบ ทำงานโดยการนำกระแสเสิร์จให้ไหลลงสู่

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ดินและรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวอุปกรณ์หรือระบบไม่ให้เกินค่าที่เป็นอันตรายและทำให้ระดับแรงดันไฟฟ้ากลับคืนสู่สภาวะปกติเมื่อเสิร์จหายไป [28][29] ในปัจจุบันกับดักเสิร์จได้รับการพัฒนาและถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายทั้งในระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำและแรงดันสูงโดยเฉพาะการนำไปใช้เพื่อป้องกันแรงดันเกินเนื่องจากฟ้าผ่ารวมถึงแรงดันเกินสวิตชิงในทุกส่วนของระบบไฟฟ้ากำลัง

กับดักเสิร์จที่ใช้งานในปัจจุบันสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด ตามลักษณะโครงสร้างที่สำคัญ คือ กับดักเสิร์จแบบมีช่องประกาย (Gap Arrester) และกับดักเสิร์จแบบไม่มีช่องประกาย (Gapless Arrester)

1) กับดักเสิร์จแบบมีช่องประกาย จะมีโครงสร้างที่สำคัญประกอบไปด้วย ช่องประกาย (Spark Gap) ต่ออนุกรมอยู่กับตัวต้านทานแบบไม่เป็นเชิงเส้นชนิดซิลิคอนคาร์ไบด์ (Silicon Carbide, SiC) บรรจุอยู่ภายในโครงสร้างที่ทำด้วยฉนวนพอร์ซเลน (Porcelain) โดยทั่วไปเรียกกับดักเสิร์จชนิดนี้ว่า กับดักเสิร์จชนิดซิลิคอนคาร์ไบด์แบบมีช่องประกาย(Gap Silicon Carbide Surge Arrester) หรือ Gap-SiC ดังแสดงในภาพที่ 2.17



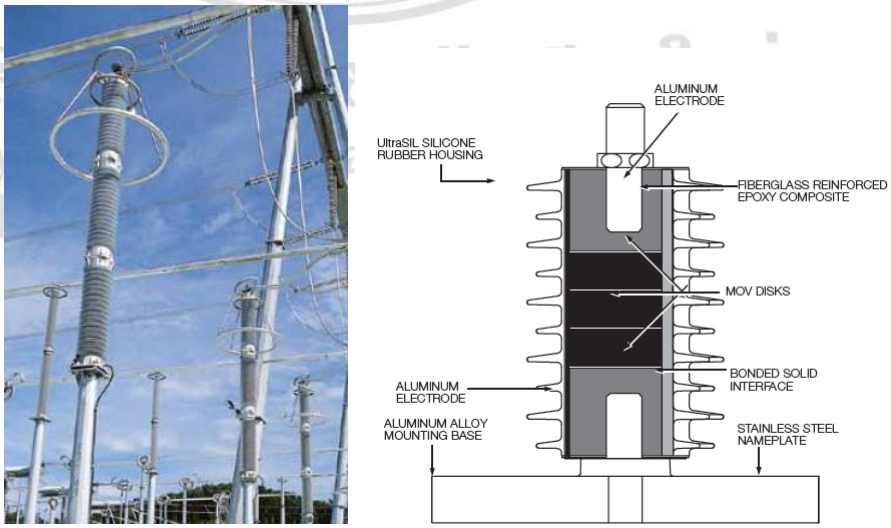
ภาพที่ 2.17 กับดักเสิร์จชนิดซิลิคอนคาร์ไบด์แบบมีช่องประกาย

ภายใต้สภาวะระดับแรงดันใช้งานปกติของระบบไฟฟ้า Gap-SiC จะมีความต้านทานที่สูงมากและไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านช่องประการเลย เมื่อมีแรงดันเกินเกิดขึ้นในระบบ เช่น แรงดันเกินเนื่องจากฟ้าผ่า หรือแรงดันเกินสวิตชิงเคลื่อนที่มายังตำแหน่งที่กับดักเสิร์จติดตั้งอยู่ จะทำให้แรงดันที่ตกคร่อมกับดักเสิร์จมีค่าสูงขึ้น หากแรงดันเกินดังกล่าวมีค่าสูงถึงแรงดันประกายข้าม (Sparkover

Voltage) ของกับดักเสิร์จ ช่องประกายจะนำกระแสเสิร์จไหลผ่านตัวซิลิคอนคาร์ไบด์ แรงดันเกินทั้งหมดจะตกคร่อมกับดักเสิร์จ

ซึ่งเมื่อกับดักเสิร์จได้รับแรงดันตกคร่อมสูงขึ้น ค่าความต้านทานของซิลิคอนคาร์ไบด์จะมีค่าลดต่ำลง ทำให้กระแสเสิร์จไหลผ่านค่าความต้านทานของซิลิคอนคาร์ไบด์ลงสู่ดิน จึงทำให้มีแรงดันตกคร่อมกับดักเสิร์จ (Residual Voltage) ที่มีขนาดต่ำกว่าแรงดันเกินเริ่มต้น จึงเป็นการรักษาระดับแรงดันเกินให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัยต่ออุปกรณ์หรือระบบที่ถูกป้องกัน เมื่อแรงดันเกินมีค่าลดลง กับดักเสิร์จจะมีค่าความต้านทานที่เพิ่มสูงขึ้น กระแสเสิร์จที่ไหลผ่านลงสู่ดินจะมีค่าลดลง และช่องประการก็จะหยุดการประกายข้ามทำให้ไม่มีกระแสเสิร์จไหลลงสู่ดิน กับดักเสิร์จจะกลับสู่สภาวะทำงานปกติได้เองภายหลังจากแรงดันเกินหายไป

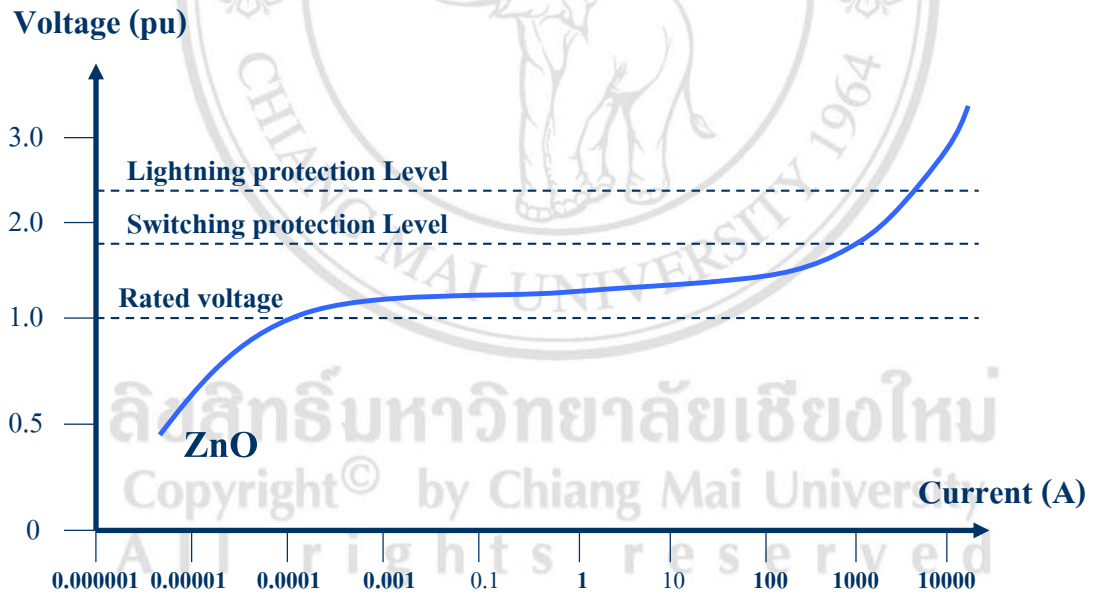
2) กับดักเสิร์จแบบไม่มีช่องประกาย เนื่องจากโครงสร้างและลักษณะการทำงานที่ซับซ้อนของกับดักเสิร์จแบบมีช่องประกาย ทำให้มีการพัฒนากับดักเสิร์จ ที่มีโครงสร้างที่ง่ายและมีประสิทธิภาพการทำงานที่ดีขึ้น โดยเลือกใช้ ซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide, ZnO) หรือ เมทัลออกไซด์ (Metal Oxide, MO) ทำหน้าที่เป็นตัวต้านทานแบบไม่เป็นเชิงเส้นต่ออนุกรมกันบรรจุอยู่ภายในโครงสร้างที่ทำด้วยฉนวนซิลิโคน (Silicone) จึงเรียกกับดักเสิร์จชนิดนี้ว่า กับดักเสิร์จชนิดซิงค์ออกไซด์แบบไม่มีช่องประกาย (Gasless-ZnO) หรือกับดักเสิร์จชนิดเมทัลออกไซด์ (Metal Oxide Varistor, MOV) ดังแสดงในภาพที่ 2.18



ภาพที่ 2.18 กับดักเสิร์จแบบไม่มีช่องประกาย

ลักษณะสมบัติการนำกระแสและแรงดันที่ตกคร่อม Gapless-ZnO หรือ MOV สามารถแสดงได้ด้วยเส้นโค้งแรงดัน-กระแส (Voltage-Current Curve) ดังแสดงในภาพที่ 2.19 โดยสามารถอธิบายหลักการทำงานของกับดักเสิร์จ แบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ

- ช่วงที่ 1 เป็นช่วงที่ระบบไฟฟ้ามีระดับแรงดันปกติ ซึ่งจะต่ำกว่าจุดเริ่มทำงานของกับดักเสิร์จ ค่าความต้านทานของกับดักเสิร์จจะมีค่าสูงมาก ทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านมีค่าน้อยมาก อยู่ในช่วง ไมโครแอมป์-มิลลิแอมป์
- ช่วงที่ 2 เมื่อมีแรงดันเกินเพิ่มขึ้นในระดับแรงดันเกินชั่วครู่ ค่าความต้านทานของกับดักเสิร์จจะมีค่าลดต่ำลงทำให้มีกระแสเสิร์จไหลผ่านลงสู่ดินมากขึ้นในหน่วย แอมป์
- ช่วงที่ 3 เมื่อแรงดันเกินที่ตกคร่อมกับดักเสิร์จมีค่าสูงมากในระดับแรงดันเกินสวิตชิงและแรงดันเกินเนื่องจากฟ้าผ่า ค่าความต้านทานของกับดักเสิร์จจะมีค่าลดต่ำลงมากทำให้กระแสเสิร์จไหลผ่านลงสู่ดินได้มากขึ้นในหน่วย กิโลแอมป์



ภาพที่ 2.19 คุณลักษณะแรงดัน-กระแสของกับดักเสิร์จ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.7.2 การควบคุมการสวิตชิง

การควบคุมการสวิตซ์ (Controlled Switching) มีวัตถุประสงค์เพื่อลดโอกาสของการเกิดแรงดันเกินชั่วครู่ที่เกิดจากการทำงานปลด-สับของเซอร์กิตเบรกเกอร์ เพื่อจ่ายไฟฟ้าหรือไม่จ่ายไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์และระบบไฟฟ้า [30][31] วิธีการนี้ได้รับการยอมรับและถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย รวมถึงนำมาทดแทนเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบมีค่าความต้านทาน

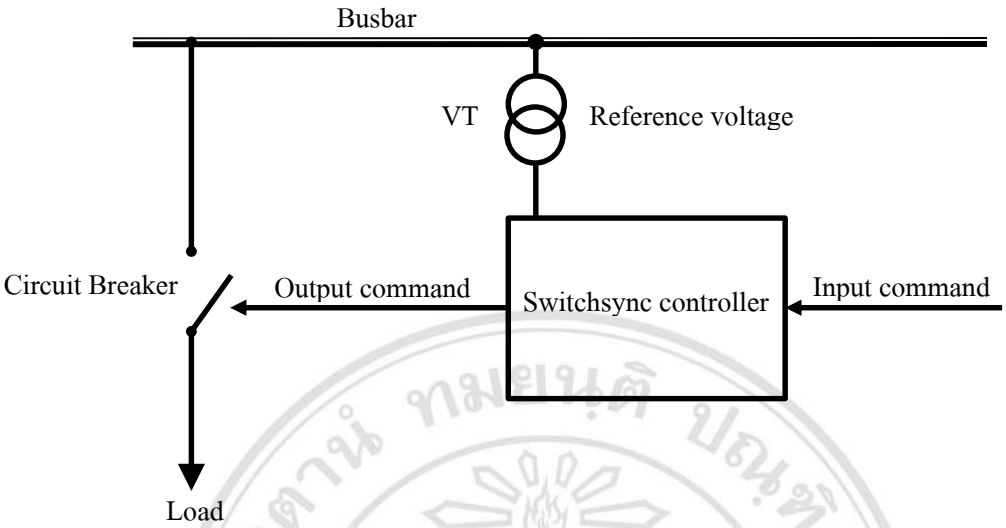
การทำงานปลด-สับของเซอร์กิตเบรกเกอร์เพื่อเปิด-ปิดวงจรไฟฟ้าสามารถทำให้เกิดปัญหาแรงดันเกินสวิตชิงที่อาจส่งผลกระทบทั้งอุปกรณ์และระบบไฟฟ้าได้ ขนาดของแรงดันเกินที่เกิดขึ้น จะขึ้นอยู่กับตำแหน่งบนรูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่หน้าสัมผัสของเซอร์กิตเบรกเกอร์เชื่อมต่อถึงกัน (Closing) หรือแยกออกจากกัน (Opening) ถ้าหากไม่มีการควบคุมการสวิตชิงจะมีโอกาสเกิดแรงดันเกินที่มีขนาดสูงมาก

วิธีการดั้งเดิมที่ถูกนำมาใช้แก้ปัญหาแรงดันเกินที่เกิดขึ้นดังกล่าว เช่น เซอร์กิตเบรกเกอร์แบบมีค่าความต้านทานและกับดักเสิร์จ รวมถึงการเพิ่มระดับของฉนวนของอุปกรณ์และระบบไฟฟ้าให้สูงขึ้น อย่างไรก็ตามวิธีการเหล่านี้อาจมีราคาแพง ความเชื่อถือได้ต่ำ และอาจยังไม่สามารถแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นที่ต้นเหตุได้ทั้งหมด

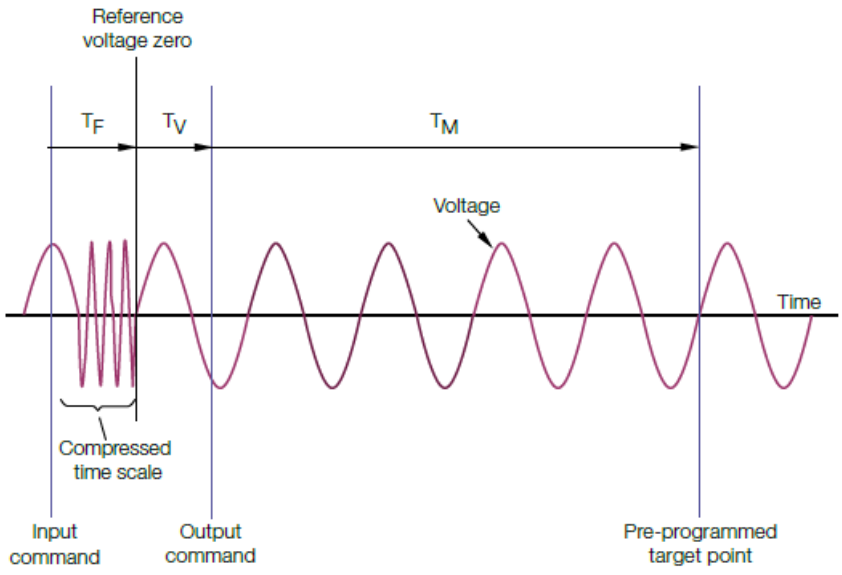
การควบคุมการสวิตชิงเป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถลดปัญหาแรงดันเกินชั่วครู่จากการควบคุมเวลาในการทำงานของอุปกรณ์สวิตซ์ คำสั่งที่ใช้ในการเปิด-ปิดเซอร์กิตเบรกเกอร์จะถูกหน่วงเวลาไว้เพื่อให้หน้าสัมผัสของเซอร์กิตเบรกเกอร์เชื่อมต่อถึงกันหรือแยกออกจากกัน ณ เวลาที่เหมาะสมซึ่งจะสัมพันธ์กับมุมเฟสของสัญญาณแรงดันไฟฟ้า

อุปกรณ์ควบคุมการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์ จะทำการตรวจจับสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของระบบและคำสั่งขาเข้า (Input Command) เพื่อประมวลผลหาเวลาหน่วงที่เหมาะสม (Optimum Delay Time) ในการสั่งให้หน้าสัมผัสของเซอร์กิตเบรกเกอร์แต่ละเฟสเชื่อมต่อหรือแยกออกจากกัน ณ ตำแหน่งบนรูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสม เช่น ตำแหน่งที่แรงดันไฟฟ้ามีค่าเป็นศูนย์ [16][32] ดังแสดงในภาพที่ 2.20 และ 2.21

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



ภาพที่ 2.20 อุปกรณ์ควบคุมการสวิตชิง



T_F Time to detect final reference voltage zero

T_V Waiting time

T_M Expected make time of circuit breaker

ภาพที่ 2.21 การทำงานของอุปกรณ์ควบคุมการสวิตซ์ ณ ตำแหน่งที่แรงดันไฟฟ้ามีค่าเป็นศูนย์ [16]