

# วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง

(HIGH VOLTAGE ENGINEERING)

รหัสรายวิชา 116-409

วิชาที่ต้องสอบผ่าน สนามแม่เหล็กไฟฟ้า 112-305

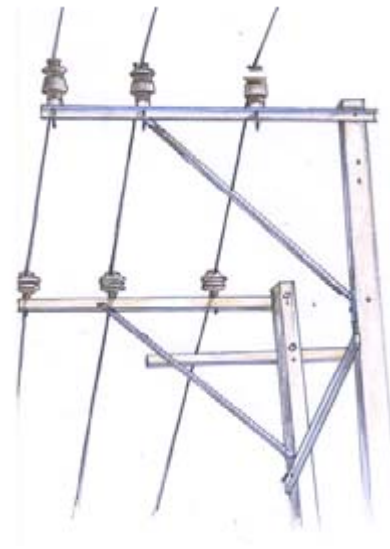
บทที่ 1 บทนำ

# ไฟฟ้าแรงสูง

มาตรฐานสากล IEC Publ.No.60 (International Electrotechnical Commission Standards) ไฟฟ้าแรงสูงหมายถึงไฟฟ้าที่มีแรงดันตั้งแต่ 1000 โวลต์ขึ้นไป

ต้นกำเนิดแรงดันไฟฟ้าสูง

- ไฟฟ้าแรงสูงที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ
- ไฟฟ้าแรงสูงที่มนุษย์สร้างขึ้น



## ไฟฟ้าแรงสูงธรรมชาติ

เกิดจากการสะสมประจุไฟฟ้าสถิต ถ้าสามารถเก็บประจุไว้ได้มากโดยไม่รั่วไหล ก็จะทำให้แรงดันไฟฟ้าสถิตสูงขึ้น

$$U = Q/C$$

เมื่อ  $U$  คือ แรงดันไฟฟ้าสถิต

$Q$  คือ ประจุไฟฟ้า

$C$  คือ ค่าเก็บประจุไฟฟ้า หรือความจุไฟฟ้า

ผลของการเก็บประจุได้ จะทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้า หรือแรงดันไฟฟ้าสูงขึ้น เมื่อแรงดันสูงขึ้นถึงระดับหนึ่ง ก็จะทำให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้า สูงถึงค่าวิกฤต จะเกิดดีสชาร์จ เป็นดีสชาร์จไฟฟ้าสถิต หรือดีสชาร์จฟ้าผ่า



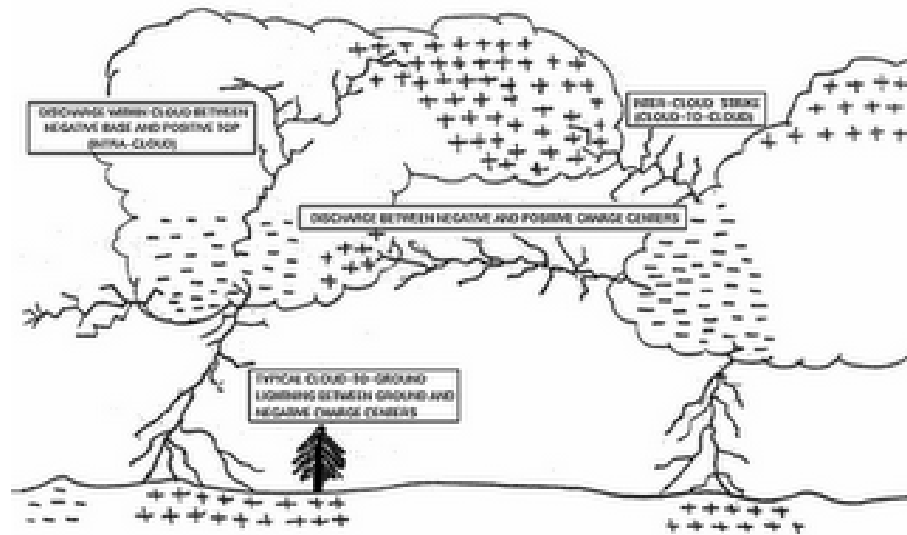
## ดีสชาร์จไฟฟ้าสถิต

เป็นดีสชาร์จที่แรงดันสูงไม่มากนัก เกิดขึ้นจากการสะสมประจุเนื่องจากการเสียดสีของวัสดุต่างชนิดกัน เช่น คนสวมรองเท้าพื้นยางเดินไปบนพรม และอากาศโดยรอบมีความชื้นต่ำ (ต่ำกว่า 50%) ทำให้เกิดประจุไฟฟ้าสะสมบนร่างกายคน เมื่อคนนั้น เดินเข้าไปใกล้ส่วนที่ต่อลงดิน ก็จะเกิดดีสชาร์จ หรือสปาร์กขึ้น



# ดิสชาร์จฟ้าผ่า

เกิดจากการสะสมประจุไฟฟ้าสถิตในลักษณะคล้ายกับ ดิสชาร์จไฟฟ้าสถิต แต่การสะสมประจุนั้นเกิดขึ้นที่ระดับสูง คือในก้อนเมฆ การเกิดดิสชาร์จอาจเกิดขึ้นระหว่างก้อนเมฆกับก้อนเมฆ หรือระหว่างกลุ่มประจุในก้อนเมฆเดียวกัน ปรากฏการณ์ที่เห็นเรียกว่า ฟ้าแลบ ถ้าดิสชาร์จเกิดขึ้นระหว่างก้อนเมฆกับพื้นโลก เรียกว่า ฟ้าแลบ



## ไฟฟ้าแรงสูงที่มนุษย์สร้างขึ้น

มนุษย์สร้างแรงดันสูง โดยใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้า เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถสร้างแรงดันได้โดยทั่วไป 20 kV สูงสุดไม่เกิน 35 kV ส่วนแรงดันสูงกว่านั้น สร้างขึ้นได้โดยอาศัยอุปกรณ์เฉพาะ ขึ้นอยู่กับชนิดของแรงดัน

การสร้างแรงดันสูงกระแสสลับ ใช้หม้อแปลงไฟฟ้า

การสร้างแรงดันสูงกระแสตรง ใช้วงจรเรกติฟายเออร์

การสร้างแรงดันสูงไฟฟ้าสถิต เครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้าสถิต

การสร้างแรงดันสูงอิมพัลส์ การอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุ

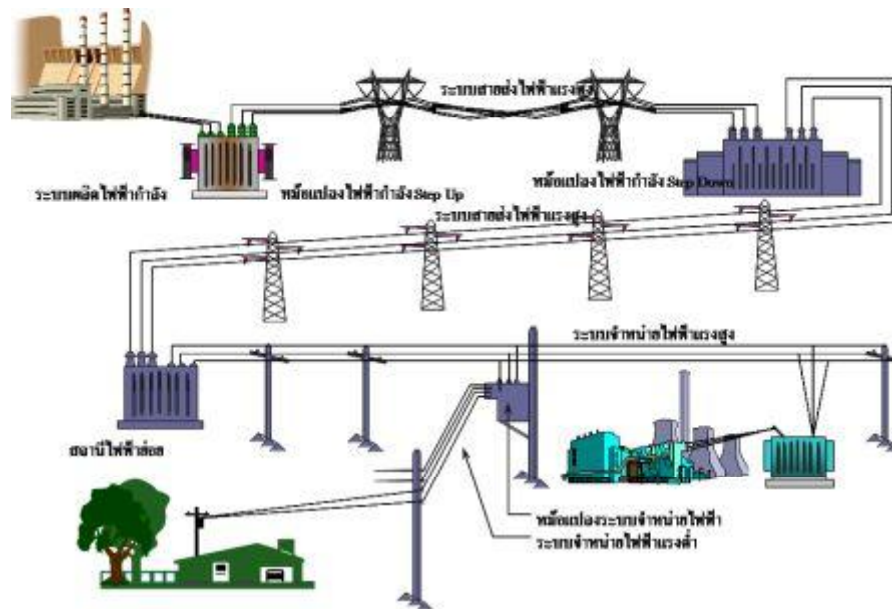
การสร้างแรงดันสูง เพื่อใช้ประโยชน์ในการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า ใช้ในการทดสอบ ในการศึกษาวิจัยด้านการฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้า ในทางการแพทย์และฟิสิกส์นิวเคลียร์ และทางอุตสาหกรรม เป็นต้น



# การใช้แรงดันสูงเพื่อการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า

แรงดันสูงที่ใช้ส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า จะเป็น AC หรือ DC การใช้แรงดันสูงในการส่งจ่ายเพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดจากความต้านทาน ในสายส่งจ่าย ซึ่งความต้านทานนี้มีค่าเพิ่มเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความยาว

การลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งให้น้อยลง ทำได้โดยลดกระแสให้น้อยลง แต่ต้องเพิ่มแรงดันสูงขึ้น เพื่อให้สามารถส่งกำลังไฟฟ้าได้เท่าเดิม



## การใช้แรงดันสูงกระแสลับ

เริ่มใช้ปี ค.ศ.1891

การเลือกกระดัดแรงดันของสายส่งให้เหมาะสมนั้น ขึ้นอยู่กับปริมาณพลังงาน และระยะทางที่ต้องการส่ง

ระดับแรงดันสูงที่ใช้ส่งกำลังไฟฟ้า แบ่งออกเป็น 3 ช่วง

- แรงดันสูง 1 kV ถึง 245 kV ; HV
- แรงดันสูงพิเศษ 245 kV ถึง 765 kV ; EHV
- แรงดันสูงยิ่ง 765 kV ขึ้นไป ; UHV



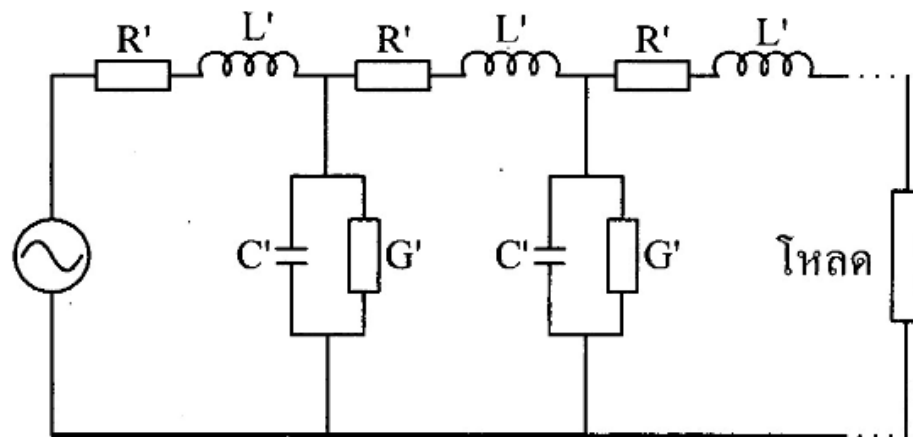


## ชนิดของสายส่งจ่าย

- สายส่งแบบขึงในอากาศ
- สายส่งแบบสายเคเบิล



# พารามิเตอร์ของวงจรสายส่งแรงสูง



$$L = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D_{eq}}{D_s} \quad \text{H/m per phase}$$

$$C = \frac{2\pi\epsilon}{\ln \frac{D_{eq}}{D_s}} \quad \text{F/m to neutral}$$

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad \Omega$$

$$G = \text{ความนำไฟฟ้า (conductance)}$$



## พารามิเตอร์ของวงจรสายส่งแรงสูง

ผลของพารามิเตอร์: R, L, C, G และ Z ( $= R + jX_L$ )

ผลของความต้านทาน: R :  $\Delta U_R = IR \rightarrow$  voltage regulation (V.R.)

$$\text{V.R.} = \frac{U_{\text{no}} - U_{\text{F.L.}}}{U_{\text{F.L.}}}$$

$$P_C = I^2 R \quad \eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{out}} + \text{loss}}$$

ผลของอิมพีแดนซ์ Z:  $\text{stability} = \frac{|U_s| \cdot |U_R|}{|Z|}$

ผลของความเหนี่ยวนำ L:  $\Delta U_L = j\omega LI \rightarrow$  V.R.

$\rightarrow$  stability

$\rightarrow$  power factor :  $\cos\phi$

ผลของค่าเก็บประจุ C :  $I = \omega CU \rightarrow$  charging, discharging

$\rightarrow$  loss

ผลของความนำ G : เกิดกระแสรั่ว  $\rightarrow$  loss



## สถานีไฟฟ้าย่อย

การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจะต้องใช้แรงดันหลายระดับ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระยะทางและปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ต้องการส่ง การเปลี่ยนระดับแรงดันจะทำได้โดยอาศัยหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง การติดตั้งหม้อแปลง อุปกรณ์วัดแรงดันและกระแส เซอร์กิตเบรกเกอร์ สวิตช์ตัดตอน และอุปกรณ์ป้องกันเช่น กับดักเสิร์จ จะติดตั้งรวมอยู่ในสถานีไฟฟ้าย่อย ซึ่งอาจเป็นแบบ AIS หรือ GIS

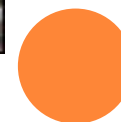


การต่อลงดินของสาย OHGW



# สถานีจ่ายไฟฟ้าออยแบบฉนวนอากาศ (AIR INSULATED SUBSTATION)

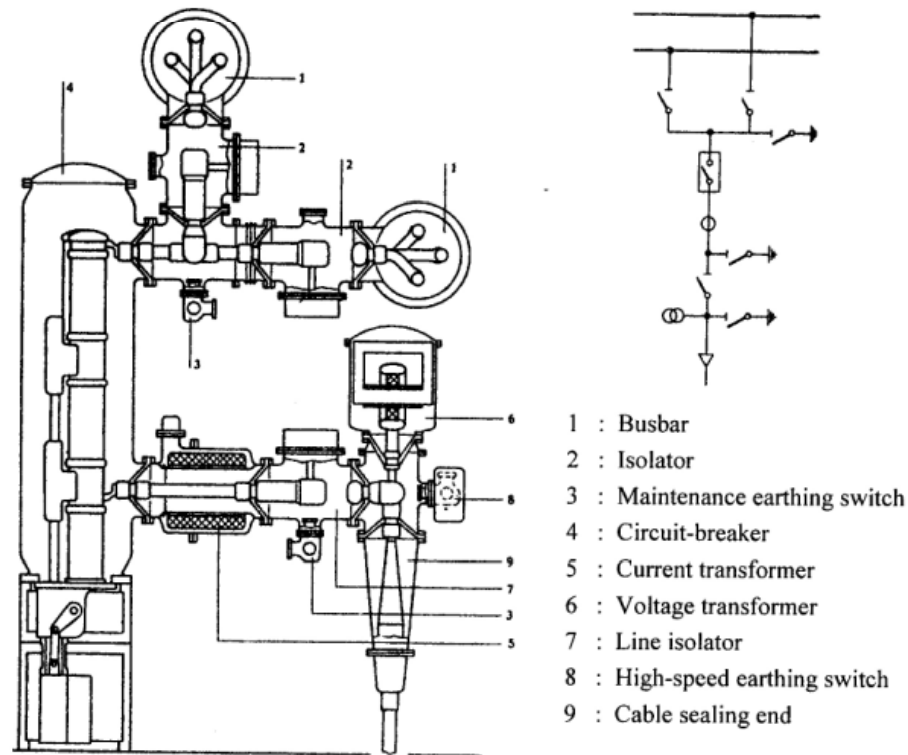
มีที่มากพอ สภาพแวดล้อมเหมาะสม



# สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยแบบฉนวนก๊าซอัดความดัน (GAS INSULATED SUBSTATION)

ติดตั้งอยู่ในถังหรือท่อโลหะ มีก๊าซอัดความดันเป็นฉนวน โดยทั่วไปเป็นก๊าซ

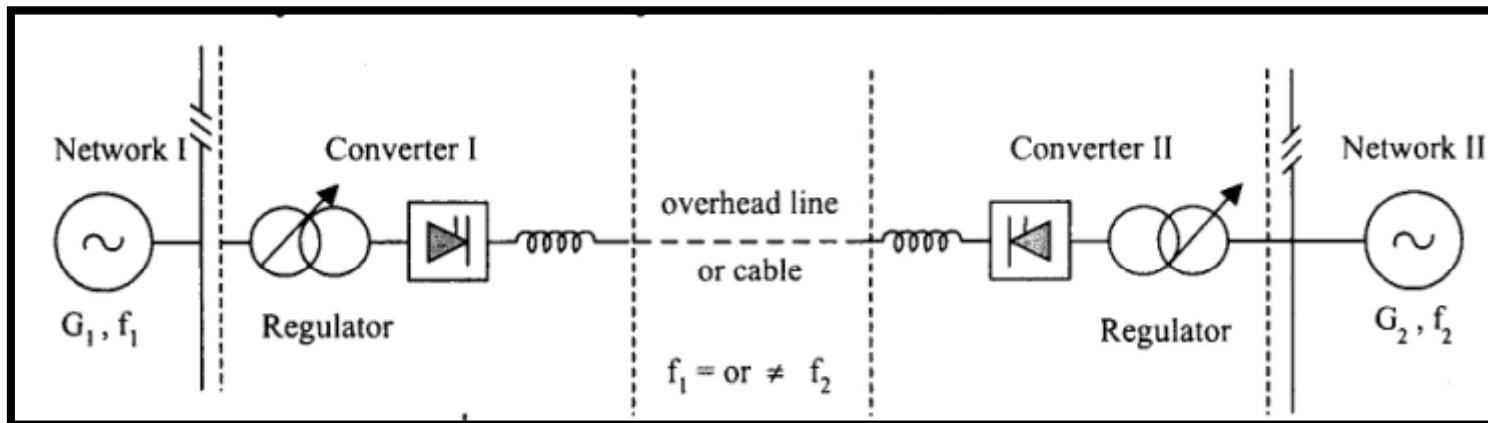
SF6



## การใช้แรงดันสูงกระแสตรง

ใช้ส่งพลังงานไฟฟ้า ใช้ทางฟิสิกส์และการแพทย์ ใช้ทดสอบวัสดุฉนวนและ  
อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง

เริ่มใช้เมื่อปี ค.ศ.1882



## การใช้แรงดันสูงกระแสตรง

### ข้อดี

ไม่มีกำลังไฟฟ้าสูญเสีย

ไม่ต้องคำนึงถึงความถี่ที่แตกต่าง

ไม่ต้องชดเชยเพาเวอร์แฟกเตอร์

### ข้อเสีย

สถานีเปลี่ยนกระแส ราคาแพง

การแปลงแรงดันทำไม่ได้เหมือน AC

การตัดวงจรขณะมีโหลดทำได้ยาก

เทคนิคการฉนวนทางแรงดันสูงกระแสตรงยุ่งยาก





## การใช้แรงดันสูงเพื่อส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าในประเทศไทย

เมื่อวันที่ 20 กันยายน 2427 เริ่มใช้ไฟฟ้าเป็นครั้งแรกอย่างเป็นทางการ ในพระบรมมหาราชวัง

ปี พ.ศ. 2444 เริ่มใช้แรงดันสูง บริษัท ไฟฟ้าสยาม ได้ตั้งโรงไฟฟ้าขึ้นที่วัดเลียบ ใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงผลิตกำลังไฟฟ้าระบบ 3 เฟส 50 Hz 3.5 kV

ปี พ.ศ. 2500 การไฟฟ้าวัดเลียบเพิ่มระดับแรงดันในการส่งเป็น 12 kV

ปี พ.ศ. 2502 การไฟฟ้าวัดเลียบเพิ่มระดับแรงดันในการส่งเป็น 69 kV

ปี พ.ศ. 2507 การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ใช้แรงดัน 230 kV ส่งกำลังไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังน้ำเขื่อนภูมิพล ลงมายังกรุงเทพฯ

ปี พ.ศ. 2532 การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ใช้แรงดัน 500 kV จาก จ. ลำปาง ลงมายังกรุงเทพฯ



## แรงดันเกินทรานเซียนต์หรือแรงดันเลิร์จ

แรงดันที่ขนาดเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และเกิดขึ้นในช่วงระยะเวลาอันสั้น ไม่เกิน 5 ms

แรงดันทรานเซียนต์เป็นต้นเหตุทำให้เกิดแรงดันเกินขึ้นในระบบสายส่ง แรงดันเกินในสายส่งทำให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสูงแก่ฉนวนไฟฟ้า อาจมีค่าสูงกว่าความคงทนของการฉนวน และนำไปสู่การเกิดผิดพลาด (Fault) จึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง ต่อเทคนิคการฉนวนไฟฟ้าแรงสูง

แรงดันเกินภายนอก คือ เกิดจากปรากฏการณ์ฟ้าผ่า

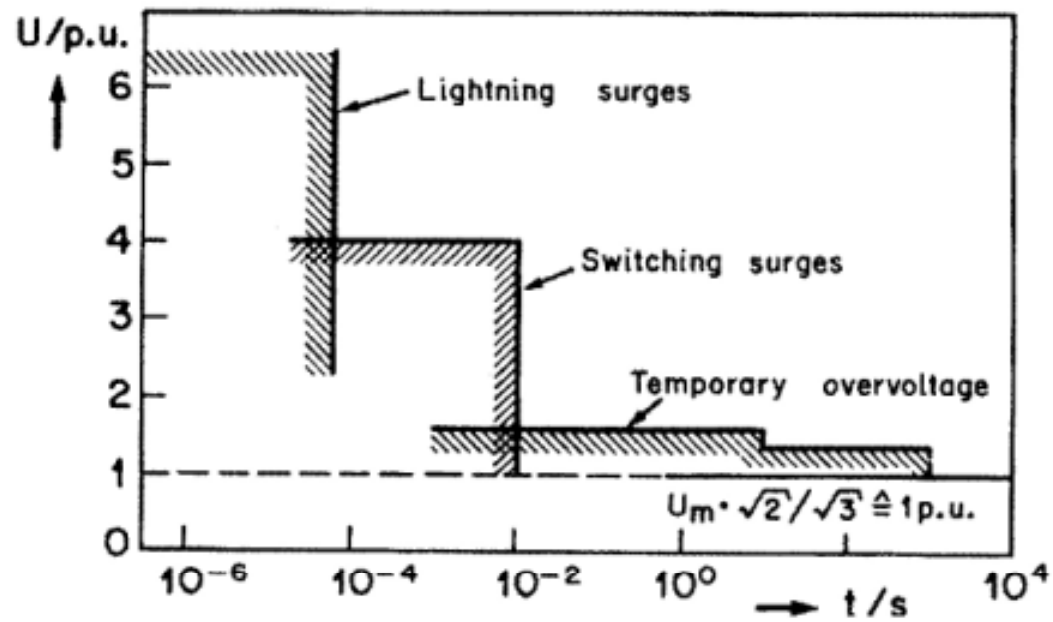
แรงดันเกินภายใน คือ เกิดจากการทำงานของสวิตช์ตัดต่อวงจร

แรงดันเกินจากความผิดพลาดในระบบ คือ เกิดจากความผิดพลาด



# แรงดันเกินทรานเซียนต์หรือแรงดันเล็ร็จ

ช่วงระยะเวลาและขนาดของแรงดันเกินแบบต่างๆ



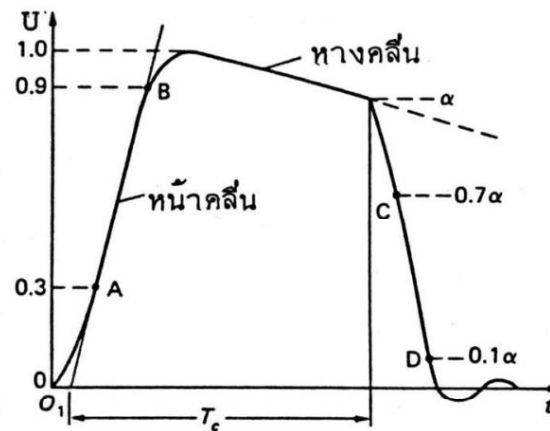
## แรงดันเกินเลี้ยวฟ้าผ่า

การส่งพลังงานไฟฟ้าแบบสายจึงในอากาศ ในสถานีไฟฟ้าย่อย ซึ่งติดตั้งอยู่  
กลางแจ้ง อุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในระบบสายส่งนี้มีโอกาสที่จะได้รับแรงดันเกินฟ้าผ่าได้  
จะทำให้เกิดแรงดันเกินขึ้นบนสายส่งแรงสูง

แรงดันเกินนี้สามารถคำนวณได้ถ้าหากทราบรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าโดยอาศัย  
หลักการคิดคำนวณตามทฤษฎีของคลื่นจร และทฤษฎีการคำนวณวงจร RLC

ช่วงหน้าคลื่น ช่วงเวลาที่แรงดันเริ่มเพิ่มขึ้นตั้งแต่ศูนย์ จนถึงค่ายอด

ช่วงหางคลื่น ช่วงเวลาที่แรงดันลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของค่ายอด



## แรงดันเกินเสิร์จฟ้าผ่า

ถ้าเกิดฟ้าผ่าลงบนสายส่งกำลังไฟฟ้า ซึ่งมีค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์

$$Z_w = \sqrt{L/C}$$

แรงดันเกินเสิร์จ สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$\Delta U = I Z_w / 2$$

เมื่อ  $\Delta U$  คือ แรงดันเกินเสิร์จฟ้าผ่า

$I$  คือ กระแสฟ้าผ่า kA

$Z_w$  คือ เสิร์จอิมพีแดนซ์  $\Omega$

แรงดันเกินเสิร์จฟ้าผ่า  $\Delta U$  จะเป็นคลื่นจรวิ่งออกไปตามสายส่งทั้งสองด้านของจุดที่ผ่าด้วยความเร็วประมาณเท่ากับแสง คือ 300 m/us หากไม่มีอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกิน ก็อาจจะทำให้ฉนวนของหม้อแปลงเกิดเบรกดาวน์ หรือฉีกพร่องขึ้นได้ ถ้าหากแรงดันเกินเสิร์จฟ้าพ่านั้นมีค่าสูงกว่าค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ ; BIL (Basic Impulse Insulation Level)



## แรงดันเกินเสิร์จฟ้าผ่า

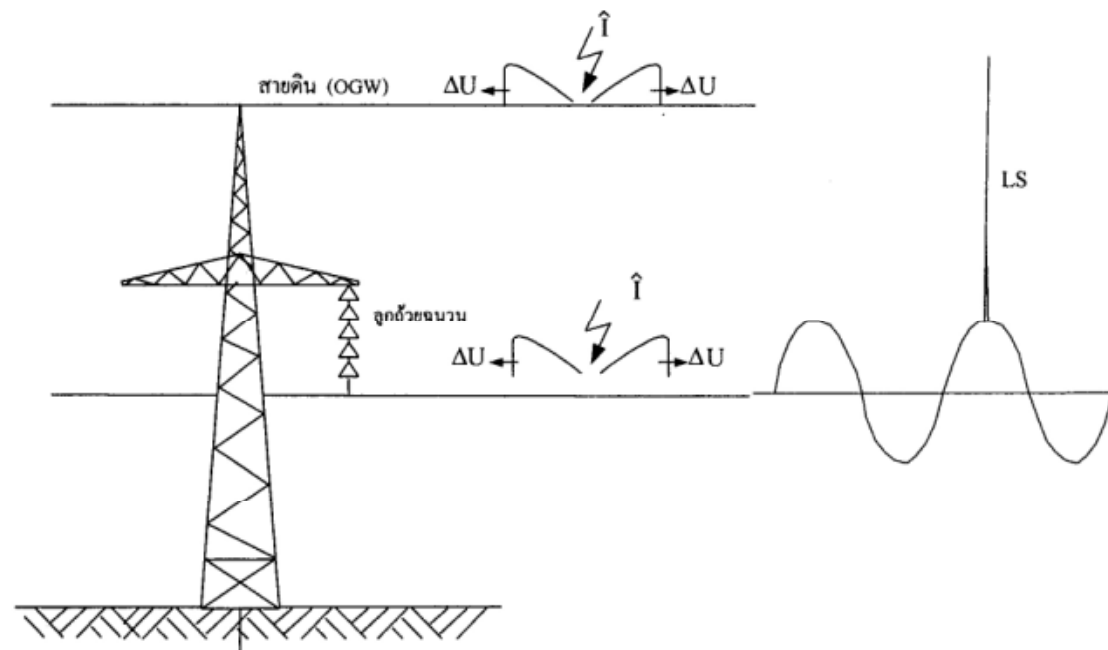
ถ้าหากฟ้าผ่าลงบนสายดินที่ซึ่งอยู่เหนือสายส่งกำลังไฟฟ้า หรือฟ้าลงบนยอดเสาไฟฟ้า จะทำให้สายดินหรือเสาไฟฟ้ามีศักย์ไฟฟ้าเกิดเป็นแรงดันเสิร์จ

$$\Delta U = \hat{I}R_c + Ldi/dt$$

เมื่อ  $\hat{I}$  คือ กระแสฟ้าผ่า kA

$R_c$  คือ ความต้านทานรากสายดิน

$L$  คือ ความเหนี่ยวนำของเสาไฟฟ้า



## แรงดันเกินเสิร์จฟ้าผ่า

แรงดันเกินเสิร์จฟ้าผ่านี้ อาจทำให้เกิดความเสียหายตามผิวย้อนกลับ บนลูกถ้วยที่ยึดสายส่งได้ ถ้าแรงดันเกินเสิร์จมีค่าสูงกว่า ค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ ของลูกถ้วยฉนวน อาจทำให้ลูกถ้วยเกิดเจาะทะลุได้

แรงดันเกินภายนอกที่เกิดจากปรากฏการณ์ฟ้าผ่า จะไม่ขึ้นอยู่กับระดับแรงดันของระบบ นั่นคือแรงดันเกินภายนอกดังกล่าว จะมีความสำคัญน้อยลง เมื่อระดับแรงดันของระบบสูงขึ้น แต่แรงดันเกินภายในระบบ คือ แรงดันเกินสวิตช์ซึ่งจะมีความสำคัญมากขึ้นตามระดับแรงดันระบบ



## แรงดันเกินเสิร์จสวิตชิง

สาเหตุที่เกิดแรงดันเกินภายในระบบ อาจเนื่องมาจากการทำงานของสวิตช์โดยผู้ปฏิบัติงาน หรือทำงานโดยอัตโนมัติเมื่อเกิดความผิดปกติขึ้น แรงดันเกินเสิร์จสวิตชิงจะไม่มี ความหมายต่อระดับการฉนวน ที่ใช้กับระบบแรงดันต่ำกว่า 300 kV แต่ที่ระบบแรงดันสูงกว่า 300 kV แรงดันอิมพัลส์แบบ สวิตชิง จะมีความหมายมากขึ้นเมื่อเทียบกับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า

แรงดันเกินสวิตชิงจากการสับสวิตช์บนสายส่ง

แรงดันเกินสวิตชิงจากการตัดวงจรที่มีตัวเก็บประจุ

แรงดันเกินจากสวิตช์ตัดวงจรที่เกิดลัดวงจร

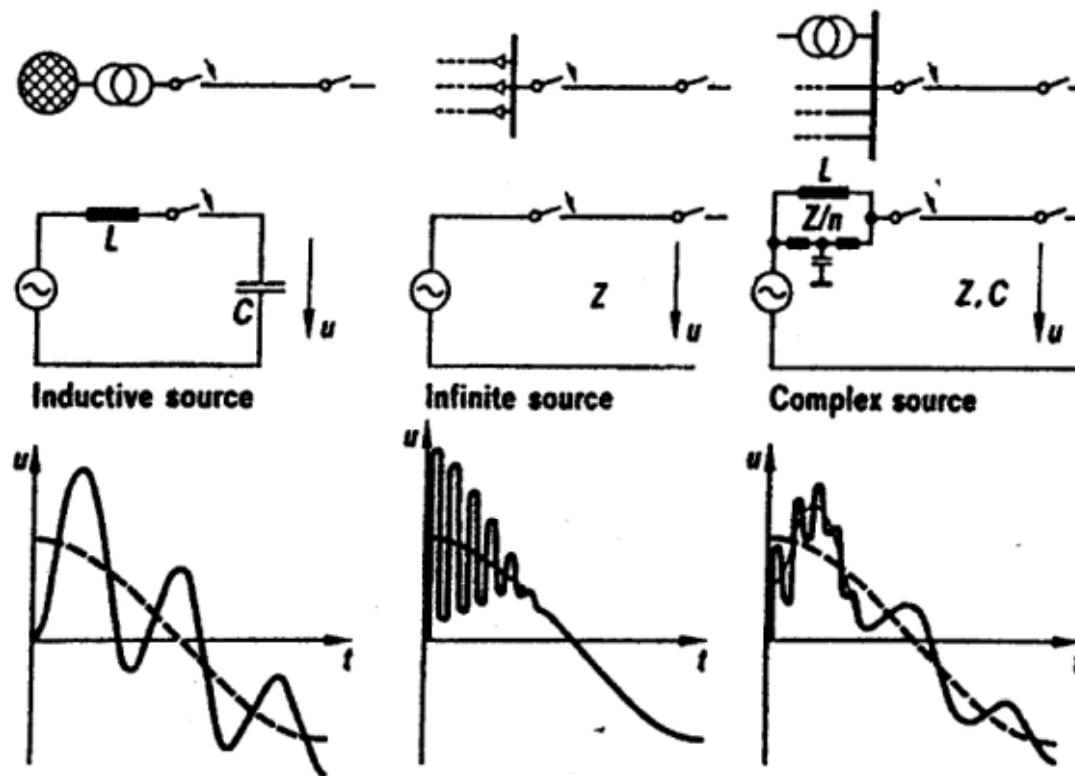
สวิตช์ตัดวงจรมีกระแส





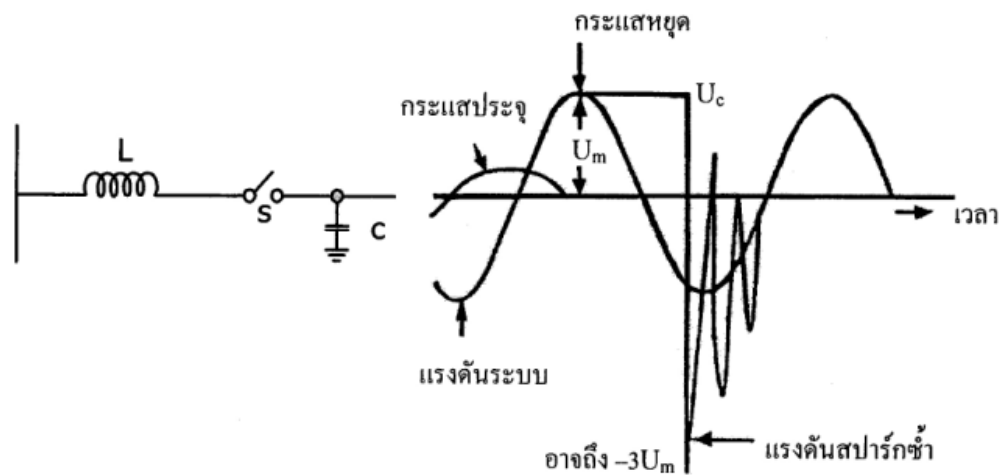
## แรงดันเกินสวิตช์จากการสับสวิตช์บนสายส่ง

ตัวอย่างแรงดันเกินสวิตช์ซึ่งบนสายส่ง เนื่องจากในสายส่งเป็นวงจรที่ประกอบด้วยความเหนี่ยวนำ  $L$  และค่าเก็บประจุ  $C$  เมื่อมีการทำงานเปิดปิดสวิตช์เพื่อตัดต่อวงจร จะทำให้เกิดออสซิลเลชัน ถ้าหากสับสวิตช์ตรงค่ายอดของแรงดันตัวจ่าย ก็อาจจะทำให้เกิดแรงดันเกินได้สูงถึง 2 เท่าของแรงดันตัวจ่าย



## แรงดันเกินสวิตช์จากการตัดวงจรที่มีตัวเก็บประจุ

การตัดวงจรที่มีตัวเก็บประจุหรือมีลักษณะเป็นความจุไฟฟ้า เช่น เคเบิลแรงสูง จะทำให้ประจุค้างอยู่ในตัวเก็บประจุ ซึ่งมีแรงดันเท่ากับค่ายอด  $U$  ขณะที่กระแสเป็นศูนย์หรืออาร์กดับ และเมื่อครึ่งไซเคิลถัดมาแรงดันของแหล่งจ่ายของระบบเป็น  $-U$  จะทำให้เกิดความต่างศักย์ระหว่างหน้าสัมผัสของสวิตช์เพิ่มขึ้นเป็น  $2U$  ถ้าแกประหว่างหน้าสัมผัสพื้นตัวกลับ เป็นฉนวนไม่เร็วพอ เมื่อเทียบกับอัตราการเพิ่มขึ้นของแรงดัน การฉนวนระหว่างหน้าสัมผัส หรือในแกบทนต่อแรงดันไม่ได้ ก็จะเกิดอาร์กหรือสปาร์กช้ำ ทำให้เกิดออสซิลเลชันขึ้น เกิดเป็นแรงดันเกินเสีร้าง



## แรงดันเกินสวิตช์จากการตัดวงจรที่มีตัวเก็บประจุ

ตัวอย่าง ตัวเก็บประจรรวมแถว(capacitor bank) 24kV 5000kVA ในระบบ 3 เฟส 50Hz นิเวศร์ลต่อลงดิน สมมติว่านิเวศร์ลของแหล่งจ่ายต่อลงดินเช่นกัน และมีความเหนี่ยวนำ  $L=1\text{mH}$  เมื่อตัดตัวเก็บประจุออกจากวงจรด้วยเซอร์กิตเบรเกอร์ มีกระแสประจุไหลผ่านเซอร์กิตเบรเกอร์ขณะวงจรถูกตัดจะทำให้เกิดอาร์กระหว่างหน้าสัมผัส ความรุนแรงของอาร์กขึ้นอยู่กับค่ากระแส

กระแสที่วงจรตัดขึ้นอยู่กับค่าแรงดันขณะนั้นหารด้วยค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของวงจร คือ

$$i = 2U\sqrt{C/L} \sin \omega_0 t.$$
$$C = \frac{\text{MVA}}{\omega(\text{kV})^2} = \frac{5}{2\pi \times 50 \times 24^2} = 27.63 \mu\text{F}$$
$$Z_w = \sqrt{\frac{1000}{27.63}} = 6.02 \Omega$$

จะได้ค่ากระแสสปาร์กช้ำค่าขอค  $\hat{i} = \frac{2 \times 24\sqrt{2}}{\sqrt{3} \times 6.02} = 6.5 \text{ kA}$

ที่ความถี่  $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = 957.5 \text{ Hz}$



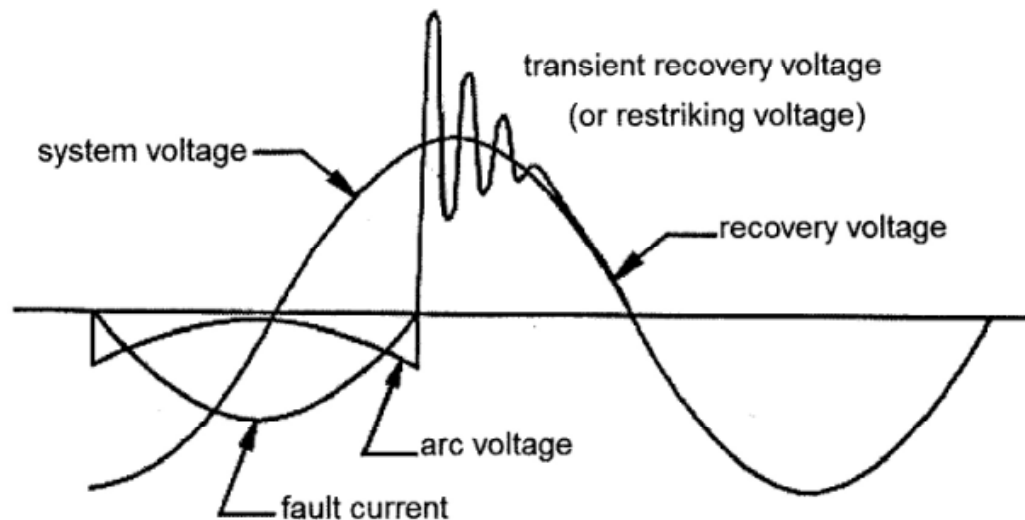
## แรงดันเกินจากสวิตช์ตัดวงจรที่เกิดลัดวงจร

ในกรณีที่สวิตช์หรือเซอร์กิตเบรกเกอร์ตัดวงจรขณะที่มีการลัดวงจร จะทำให้

เกิดอาร์กระหว่างหน้าสัมผัสที่แยกออก

เมื่ออาร์กดับ แรงดันฟื้นตัวระหว่างหน้าสัมผัสของเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่เปิดออก ก็คือแรงดันคร่อมค่าเก็บประจุ C เนื่องจาก LC ในวงจรจะทำให้เกิดออสซิลเลชันความถี่สูงซ้อนความถี่ระบบ แรงดันนี้เรียกว่า แรงดันฟื้นตัว (recovery voltage)

ถ้าเกิดสปาร์กซ้ำ ก็เรียกว่า แรงดันสปาร์กซ้ำ (restriking voltage) เป็นผลให้เกิดแรงดันเกินเล็งจสวิตซ์



## แรงดันเกินจากสวิตช์ตัดวงจรที่เกิดลัดวงจร

ค่าแรงดันเสิร์จคร่อมหน้าสัมผัสของเซอร์กิตเบรเกอร์ หาได้จาก

$$u(t) = u_c(t) = U_m (1 - \cos \omega_0 t)$$

เมื่อ  $\omega$  คือ ความถี่เชิงมุมกำลังไฟฟ้า

$\omega_0$  คือ ความถี่เชิงมุมธรรมชาติของวงจร ( $1/\sqrt{LC}$ )

ถ้าคำนึงถึงค่าความต้านทาน R จะได้แรงดันคร่อมหน้าสัมผัสเซอร์กิตเบรเกอร์เป็น

$$u(t) = u_c(t) = \omega LI (1 - e^{-\alpha t} \cos \omega_0 t)$$

โดยที่  $\alpha = R/2L$  และ  $I =$  กระแสลัดวงจร  $= U/\omega L$

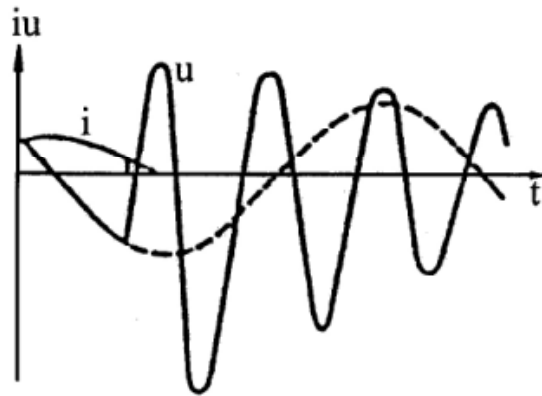


## สวิตช์ตัดวงจรมีกระแส

ถ้าเซอร์กิตเบรกเกอร์ ตัดวงจรขณะยังมีกระแสไหลอยู่ อาจทำให้เกิดแรงดันเสิร์จเกินขึ้นได้ เนื่องจากพลังงานของสนามแม่เหล็กจะเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้า

$$\frac{1}{2}CU^2 = \frac{1}{2}LI_0^2$$
$$U = I_0\sqrt{L_m/C}$$

- เมื่อ U คือ แรงดันเกินที่เกิดขึ้น  
I<sub>0</sub> คือ กระแสที่ถูกตัด  
L<sub>m</sub> คือ ความเหนี่ยวนำสร้างสนามแม่เหล็ก  
C คือ ค่าความจุไฟฟ้าของระบบด้านหม้อแปลง



## สวิตช์ตัดวงจรมีกระแส

ตัวอย่าง เซอร์กิตเบรกเกอร์ตัดกระแสสร้างสนามแม่เหล็กของหม้อแปลง 3 เฟส 50Hz ขนาด 2000kVA 24kV ที่ 2.5A และมีค่าเก็บประจุ 2000pF จงหาแรงดันคร่อมหน้าสัมผัสของ CB

$$L_m = \frac{U_{ph}}{\omega I_m} = \frac{24 \times 1000}{\sqrt{3} \times 2\pi \times 50 \times 2.5} = 17.64 \text{ H}$$

$$\text{เสิร์จอิมพีแดนซ์ } Z_w = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{17.64 \times 10^{-2}}{2000 \times 10^{-12}}} = 93.9 \times 10^3 \Omega$$

$$\text{ฉะนั้น แรงดันคร่อมหน้าสัมผัส } U_{max} = 2.5 \times 93.9 \times 10^3 = 234.8 \text{ kV}$$



## แรงดันเกินชั่วคราว (TEMPORARY OVERVOLTAGE ; TOV)

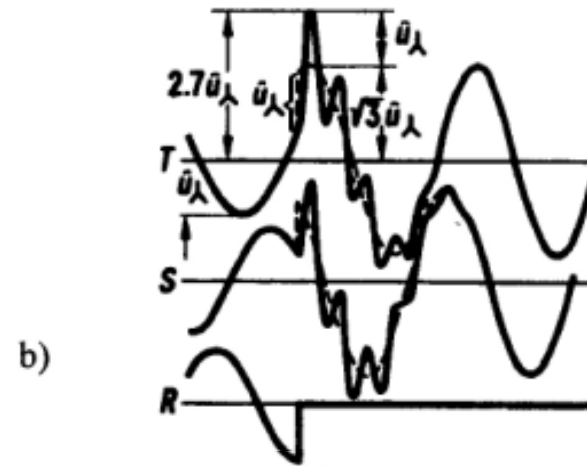
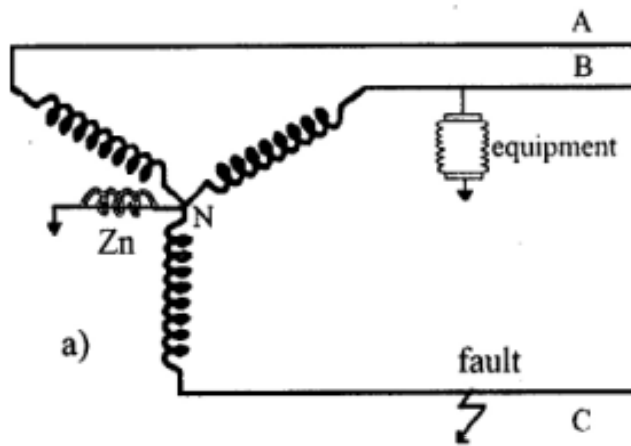
จะเป็นแรงดันเกินที่มีช่วงเวลาการเกิดคงอยู่นานกว่า แรงดันเสิร์จฟ้าผ่า และแรงดันเสิร์จสวิตช์ เกิดขึ้นจาก การปลดโหลดเต็มทีแบบเหนี่ยวนำออกไปกะทันหัน และเพิ่มโหลดแบบเก็บประจุเข้าไป แรงดันที่โหลดจะเพิ่มสูงขึ้น ในบางกรณีแรงดันเกินชั่วคราวอาจเกิดจากรีโซแนนซ์ และเฟอโรรีโซแนนซ์ เกิดผิดปร่องลงดินแบบไม่สมดุล และผลของเฟอร์รันตี แรงดันเกินชั่วคราวมีความสำคัญยิ่งต่อการเลือกค่าที่กำหนดของกัปกักแรงดันเกินเสิร์จ(arrester) ที่มีเงื่อนไขว่า กัปกักจะต้องไม่ทำงานที่แรงดัน TOV เพราะกัปกักจะทนต่อพลังงานของ TOV ไม่ได้จะเกิดระเบิด เนื่องจากพลังงานความร้อน





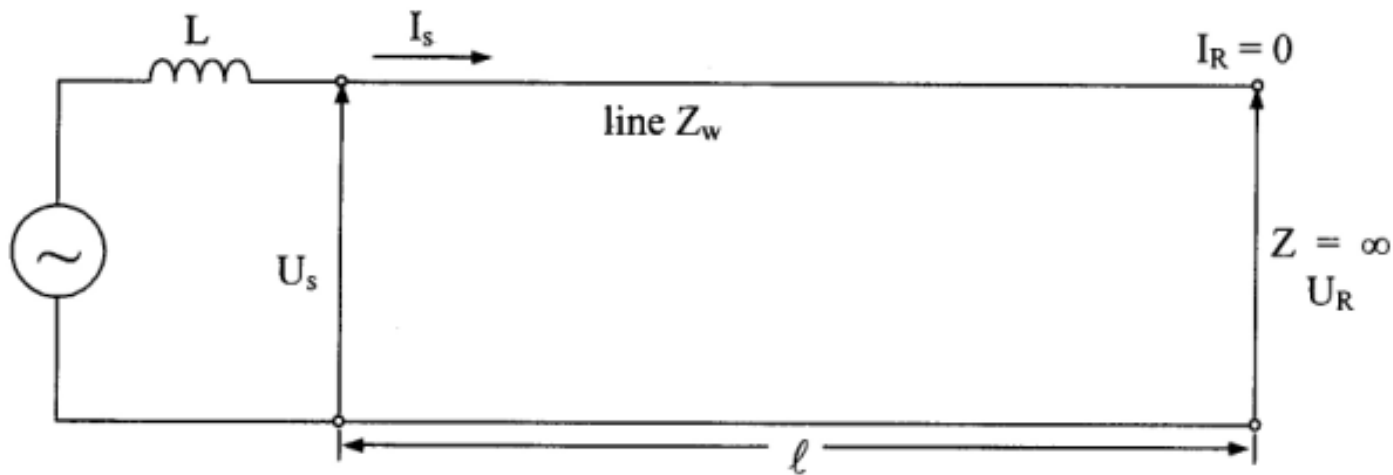
## แรงดัน TOV จากผิดพลาดงดินแบบไม่สมดุล

ถ้าเฟสหนึ่งผิดพลาดงดิน เกิดแรงดันเกินมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับการต่อนิวทรัล N ลงดินเป็นแบบใด ในกรณีที่นิวทรัลไม่ต่อลงดิน หรือต่อผ่านอิมพีแดนซ์มีค่าโอห์มสูง เมื่อเกิดเฟสหนึ่งผิดพลาดงดิน จะทำให้เฟสที่ไม่ผิดพลาดมีแรงดันเกินเท่ากับแรงดันเฟส-เฟส อุปกรณ์จะได้รับแรงดัน  $\sqrt{3}$  เท่าของแรงดันเฟส ถ้านิวทรัลต่อลงดินโดยตรง เฟสที่ไม่ผิดพลาดจะมีแรงดันเพิ่มขึ้นสูงกว่าแรงดันใช้งานปกติ แต่จะต่ำกว่าแรงดันเฟส-เฟส คือไม่เกิน 80% ของแรงดันเฟส-เฟสของระบบ



## ผลของเฟอร์รันตี

เป็นผลของการสับวิตช์บนสายส่งระยะไกล ที่ปลายทางไม่มีโหลด แต่ที่ต้นทางจะมีการจ่ายกระแสเนื่องจากค่าเก็บประจุของสายส่ง จึงทำให้มีกระแสอัดประจุป้อนให้กับสายส่ง การที่ปลายทางไม่มีโหลดนี้เอง จะทำให้เกิดแรงดันเกินขึ้นที่ปลายทางได้



## คลื่นจร (TRAVELING WAVES)

คลื่นจร คือ เมื่อมีไฟฟ้าลงบนสายส่งทำให้เกิดแรงดันเกินเสิร์จ และเคลื่อนที่หรือจรไปบนสายส่งทั้งสองด้านของจุดที่ไฟฟ้าลง

คลื่นเคลื่อนที่ในอากาศ เช่น สายส่งแบบขึงในอากาศ คลื่นจะมีความเร็วประมาณความเร็วแสง 300m/us ความเร็วในเคเบิล 150m/us การเคลื่อนที่ของคลื่นจรบนสายส่งขึงอากาศระยะระหว่างเสาห่างกัน 300m จะใช้เวลา 1us ถ้าคลื่นจรเคลื่อนที่บนสายส่งขึงอากาศยาว 300km จะใช้เวลา 1ms คิดระยะทางจากความยาวคลื่นอิมพัลส์ไฟฟ้า 100us จะเป็นระยะทาง 30km ช่วงหน้า 1us จะเป็นระยะทาง 300m

