

บทที่ 2

ทฤษฎีเบื้องต้น

2.1 บทนำ

ไฟฟ้าแรงสูงตามความหมายที่ระบุไว้ในมาตรฐานสากล หมายถึงแรงดันไฟฟ้าที่สูงตั้งแต่ 1000 โวลต์ ขึ้นไป ไฟฟ้าแรงสูงที่เป็นปรากฏการณ์ฟ้าผ่าตามธรรมชาติ เป็นผลของการเกิดดิสชาร์จหรือคายประจุไฟฟ้าที่สะสมอยู่ในก้อนเมฆ และทำให้เกิดสนามไฟฟ้าระหว่างก้อนเมฆและดิน มีค่าสูงมากจนอากาศแตกตัวแล้วเกิดไอออนในเซชันแบบสมบูรณจากก้อนเมฆลงสู่พื้นดิน

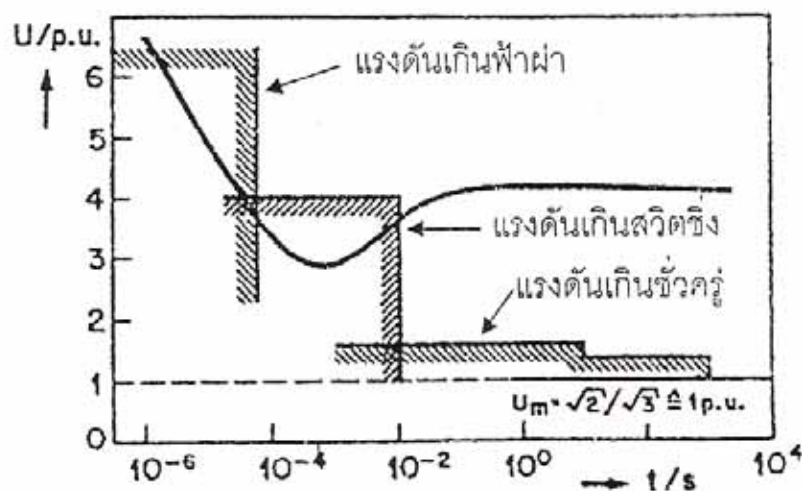
ในระบบส่งจ่ายไฟฟ้ามีโอกาสได้รับแรงดันเกินที่มีต้นกำเนิด 2 ประเภท ประเภทแรกมีต้นกำเนิดมาจากภายในบรรยากาศ เช่น ปรากฏการณ์ฟ้าผ่า ประเภทที่สองมีต้นกำเนิดจากระบบ เช่น แรงดันเกินชั่วคราว และแรงดันเกินสวิตชิงอันเนื่องมาจากการปิดวงจร เปิดวงจร หรือเกิดจากการผิดปกติ [1] โดยแรงดันเกินเหล่านี้อาจมีขนาดเกินกว่าแรงดันระบบหลายเท่า เมื่อพิจารณาขนาดของช่วงระยะเวลาที่เกิดขึ้น อาจแบ่งแรงดันเกินออกได้เป็น 3 ชนิด คือ

2.1.1 แรงดันเกินฟ้าผ่า

2.1.2 แรงดันเกินสวิตชิง

2.1.3 แรงดันเกินชั่วคราว

ช่วงระยะเวลาและขนาดของแรงดันเกินทั้ง 3 ชนิดมีค่าแตกต่างกันดังรูปที่ 1 เพื่อให้เห็นได้ชัดเจนว่าแรงดันเกินแต่ละชนิดนั้นมีขนาดมากน้อยเพียงใด



รูปที่ 2.1 ช่วงระยะเวลาและขนาดของแรงดันเกินประเภทต่างๆ

จึงมีการเทียบขนาดแรงดันที่เกิดขึ้นเป็นจำนวนเท่าของแรงดันเฟสค่ายอด ตามสมการที่ 2.1

$$U_{ph} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot U_m = 1p.u.(per\ unit) \quad (2.1)$$

ในรูปที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าแรงดันเกินฟ้าผ่าจะมีขนาดเป็นจำนวนมากกว่าแรงดันเกินชนิดอื่น คือมีโอกาสสูงมากกว่า 6 เท่าของแรงดันเฟสค่ายอด จึงมีความจำเป็นที่จะต้องมีการวิเคราะห์เพื่อการป้องกันและการออกแบบให้เหมาะสม

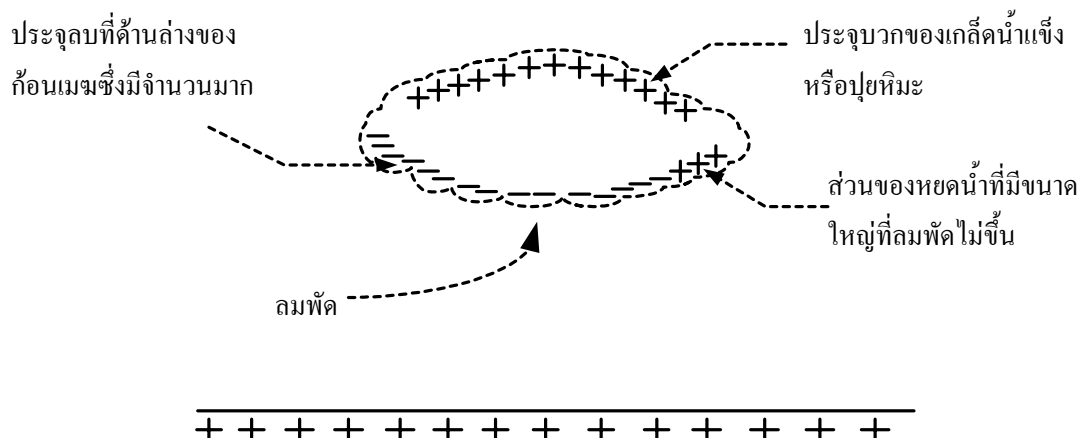
การหาค่าเปอร์เซ็นต์ของพารามิเตอร์ใด จำเป็นต้องมีฐานเพื่ออ้างอิงหรือเปรียบเทียบ เช่น แรงดันเฟสค่ายอดที่เกิดขึ้น เปรียบเทียบกับค่าอ้างอิง คือแรงดันสูงสุดที่พวงลู่กั้วรับได้ จึงมีการเทียบขนาดแรงดันที่เกิดขึ้นเป็นจำนวนเท่าของแรงดันสูงสุดที่พวงลู่กั้วรับได้ (แสดงในตารางที่ 3.1) อยู่ในรูปของเปอร์เซ็นต์หรือเปอร์เซ็นต์ของค่าอ้างอิง (Reference Value) ตามสมการที่ 2.2

$$\text{ค่าเปอร์เซ็นต์แรงดันวาวไฟวิกฤต} = \frac{\text{แรงดันที่เกิดจากฟ้าผ่า(กิโลโวลต์)}}{\text{แรงดันสูงสุดที่พวงลู่กั้วรับได้ (กิโลโวลต์)}} \quad (2.2)$$

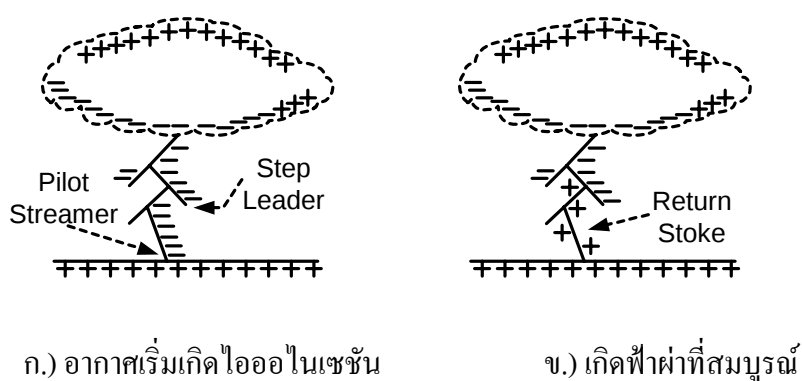
2.2 ปรากฏการณ์ฟ้าผ่า (The Lightning Flash)

การเกิดปรากฏการณ์ฟ้าผ่าเกิดจากประจุบวกและประจุลบบนก้อนเมฆ เกิดขึ้นเนื่องจากมีลมพัดเมล็ดฝนจากส่วนล่างของก้อนเมฆขึ้นไปด้านบนที่เย็นมากจนเป็นเกล็ดน้ำแข็ง เกิดการเสียดสีของอากาศและหยดน้ำทำให้เกิดไฟฟ้าสถิต โดยมากด้านล่างของก้อนเมฆจะเป็นประจุลบและมีบางส่วนเป็นประจุบวกประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเกิดเนื่องจากหยดน้ำมีขนาดใหญ่เกินกว่าที่ลมจะพัดพาขึ้นไปได้ ส่วนบนของก้อนเมฆจะเป็นประจุบวก ดังรูปที่ 2.2 เมื่อเกิดประจุที่ก้อนเมฆทำให้เกิดสนามไฟฟ้าระหว่างก้อนเมฆและดิน ถ้าสนามไฟฟ้าที่สะสมสูงมากเกินกว่าที่อากาศจะทนได้ ก็จะมีการแตกตัวของอากาศและเปลี่ยนสภาพอากาศจากฉนวนเป็นตัวนำ เกิดฟ้าผ่าลงสู่พื้นดิน (สนามไฟฟ้าวิกฤติได้ก้อนเมฆประมาณ 10 KV / cm.) เนื่องจากสภาพอากาศในแต่ละบริเวณมีความดันและอุณหภูมิไม่เท่ากัน ดังนั้นการเกิดไอออไนเซชันจึงต่างกันทำให้เห็นการเกิด การแตกตัวของอากาศเป็นเหมือนรากต้นไม้ ดังรูปที่ 2.3 (ก) ด้านหัวของฟ้าผ่าเรียกว่า Pilot Streamer แต่ละแยกของฟ้าผ่าเรียกว่า Step Leader ช่วงดังกล่าวประจุบนก้อนเมฆจะเคลื่อนที่ลงมาไม่รวดเร็วนัก เกิดกระแสน้ำไม่ถี่ร้อยแอมแปร์ ช่วงนี้ยังไม่เห็นแสงหรือได้ยินเสียง เมื่อฟ้าผ่าลงถึงพื้นดินเกิดการรวมตัวกันอย่างรวดเร็วระหว่างประจุบวกและลบ ทำให้เกิดกระแสมากขึ้น กระแสที่เกิดขึ้นจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับจำนวนประจุบนก้อนเมฆ ความเร็วในการเคลื่อนที่ของประจุ

การเคลื่อนที่ของประจุจากภาคพื้นดินเพื่อขึ้นไปรวมตัวกับประจุบนก้อนเมฆเรียกว่า Return Stroke ดังรูปที่ 2.3 (ข) ทำให้เกิดแสงและเสียง



รูปที่ 2.2 ประจุไฟฟ้าที่เกิดที่ก้อนเมฆก่อนเกิดฟ้าผ่า



ก.) อากาศเริ่มเกิดไอออไนเซชัน

ข.) เกิดฟ้าผ่าที่สมบูรณ์

รูปที่ 2.3 ขั้นตอนการเกิดฟ้าผ่า

กระแสฟ้าผ่าโดยเฉลี่ยที่เกิดขึ้นมีค่าประมาณ 10 – 20 กิโลแอมแปร์ กระแสฟ้าผ่าสูงสุดที่เคยมีการวัดได้มีค่าประมาณ 240 กิโลแอมแปร์ กระแสฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นมีค่าสูงกว่า 20 กิโลแอมแปร์ ฉนวนในระบบไฟฟ้ากำลังมีโอกาสเสียหายได้ เพราะฉนวนในระบบถูกออกแบบโดยขึ้นกับกระแสฟ้าผ่าเฉลี่ยเท่านั้น แต่ถ้าออกแบบฉนวนให้ขึ้นกับกระแสฟ้าผ่าสูงๆ ก็ต้องลงทุนสูงมาก ซึ่งกระแสฟ้าผ่าสูงมากๆ นั้นนานปีจึงเกิดขึ้นสักครั้ง จึงไม่คุ้มกับการลงทุน

2.3 ผลที่เกิดขึ้นจากฟ้าผ่า (The Lightning Flash of Effect)

ผลที่เกิดขึ้นจากฟ้าผ่าทำให้เกิดความเสียหายสามารถแยกออกได้ 4 แบบ

2.3.1 แรงดัน

แรงดันฟ้าผ่าที่มีค่าสูง ทำให้ฉนวนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงเสียหาย ถ้าอุปกรณ์นั้นถูกฟ้าผ่าโดยตรง ดังนั้นการลดแรงดันดังกล่าวจึงมีความจำเป็น ซึ่งในทางปฏิบัติจะพยายามไม่ให้ฟ้าลงสายส่งโดยตรง แต่จะใช้สายดินรับฟ้าผ่า เพื่อให้แรงดันเหนี่ยวนำที่ เกิดในสายเฟสมีค่าน้อยลง

2.3.1.1 แรงดันเสิร์จที่สะท้อนจากฐานเสา การที่ฟ้าผ่าลงที่สายดินยอดเสาส่ง

ดังรูปที่ 2.4 จะทำให้เกิดแรงดันเกิน ขึ้นบนสายดิน และในขณะเดียวกัน ก็เกิดแรงดันเหนี่ยวนำที่สายเฟส ทำให้เกิดแรงดันระหว่างสายเฟสกับสายดิน แรงดันดังกล่าวถ้ามีมากก็ทำให้เกิดความเสียหายที่เสา จะเกิดเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายดินและเสาส่ง ซึ่งทำให้แรงดันที่เสามีค่าตามสมการที่ 2.3 โดยฟ้าผ่าลงที่สายดินยอดเสาส่งทำให้เสิร์จอิมพีแดนซ์รวมมีค่า $Z_g // Z_T // Z_g$ ตามสมการที่ 2.4 โดยทั่วไปค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของเสามีค่าโดยประมาณ 60 – 150 โอห์ม และความเร็วของคลื่นลัดที่ 300 เมตรต่อไมโครวินาที

$$V_T = \frac{Z_T (Z_g / 2)}{Z_T + (Z_g / 2)} I_o \quad (2.3)$$

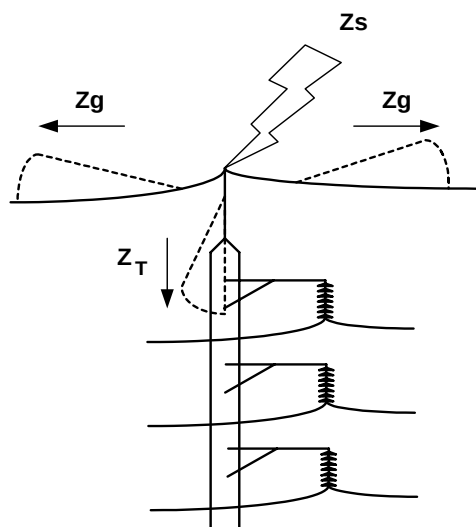
$$Z = Z_T / (1 + 2Z_T / Z_g) \quad (2.4)$$

เมื่อ	V_T	คือ แรงดันเกินฟ้าผ่ายอดเสา
	Z_T	คือ เสิร์จอิมพีแดนซ์ของเสาส่ง
	Z_g	คือ เสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายดิน
	I_o	คือ กระแสฟ้าผ่า

ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับจากฐานเสามีค่าตามสมการที่ 2.5

$$\alpha_T = \frac{Z_T - R_i}{Z_T + R_i} \quad (2.5)$$

เมื่อ	α_T	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน
	R_i	คือ ค่าความต้านทานอิมพัลส์



รูปที่ 2.4 ฟ้าผ่าลงที่สายล่อฟ้าบนเสาสูง

สมการที่ 2.6 แสดงแรงดันที่ยอดเสาก่อนที่จะเคลื่อนจะสะท้อนจากฐานเสาจะเดินทางมาถึง

$$V_{TT} = \frac{Z_T T_T}{t_f} I_o \quad (2.6)$$

เมื่อ V_{TT} คือ ค่าแรงดันที่ยอดเสาก่อนที่จะเคลื่อนจะสะท้อนจากฐานเสา
 T_T คือ เวลาที่เคลื่อนเดินทางจากยอดเสาถึงฐานเสา
 t_f คือ เวลาคืบคลาน

สมการที่ 2.7 แสดงแรงดันสุดท้ายหลังจากที่มีการสะท้อนจากฐานเสา

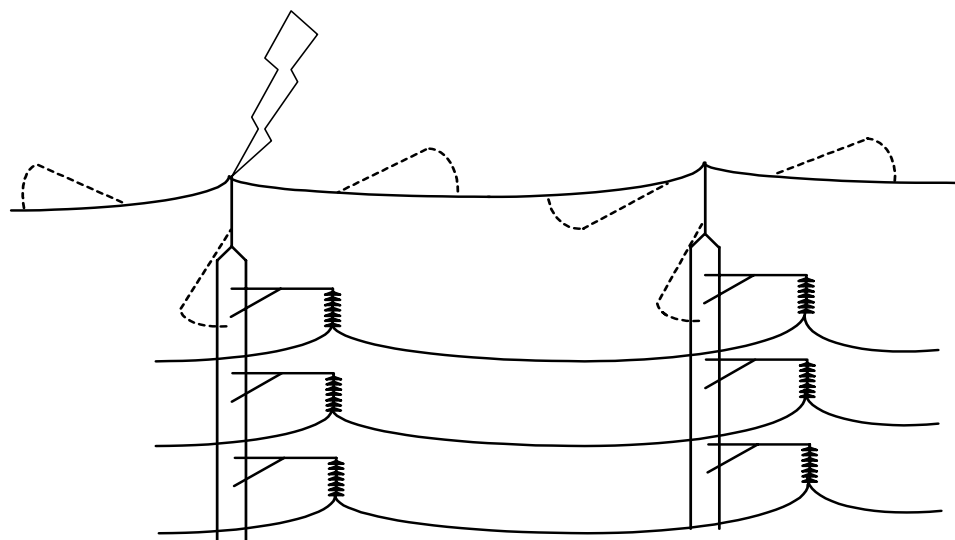
$$V_F = \alpha_T V_{TT} - V_T \quad (2.7)$$

แรงดันคร่อมฉนวนลูกถ้วยหาได้จากสมการที่ 2.8

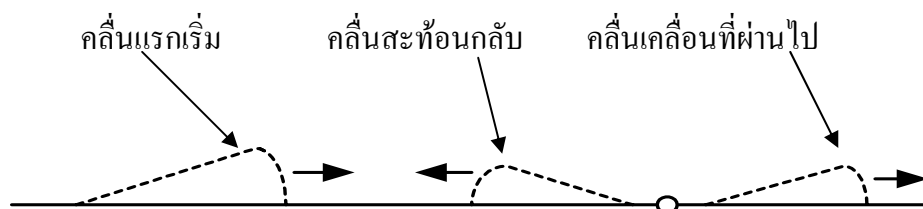
$$V_i = V_T (1 - K) \quad (2.8)$$

V_i คือ แรงดันวาบไฟตามผิวลูกถ้วย (kV)
 V_T คือ แรงดันเกินฟ้าผ่ายอดเสา
 K คือ ตัวประกอบค้ำปลิงระหว่างสายดินและสายเฟส (มีค่าประมาณ 0.15 - 0.30)

2.3.1.2 แรงดันลักร์จที่สะท้อนจากเสาต้านัดไป ผลของความต้านทานดินที่ฐานเสาส่งมีผลอย่างมากต่อแรงดันที่เกิดขึ้น ดังรูปที่ 2.5 เพราะถ้าความต้านทานดินน้อย ก็ทำให้ค่าแรงดันที่เสาส่งน้อยลงด้วย ตามทฤษฎีของคลื่นเคลื่อนที่ในสายส่ง คลื่นที่วิ่งไปจะมีคลื่นส่วนหนึ่งจะผ่านไปและคลื่นอีกส่วนหนึ่งจะสะท้อนกลับ ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.5 คลื่นเคลื่อนที่และสะท้อนกลับจากเสาข้างเคียง



รูปที่ 2.6 ลักษณะการเคลื่อนที่ของคลื่นเมื่อเกิดฟ้าผ่า

2.3.2 ค่าความชันกระแสไฟฟ้า

ความชันของกระแสไฟฟ้ามีผลต่ออุปกรณ์ไฟฟ้า ตามสมการที่ 2.9

$$E = L \frac{di}{dt} \quad (2.9)$$

เมื่อมีกระแสที่ความชันมากๆ แม้ขนาดกระแสจะมีค่าต่ำก็ตาม จะทำให้เกิดแรงดันสูงได้ เมื่อมีอุปกรณ์ที่มีคุณสมบัติเป็นความเหนี่ยวนำ เช่น ernel กระแสไฟฟ้าต่ำๆ แต่มีความชันมากสามารถเล็ดลอดผ่านอะเรสเตอร์มาได้ เมื่อเข้ามาหมือแปลงที่มีคุณสมบัติเป็นความเหนี่ยวนำ ก็ทำให้เกิดแรงดันสูงภายในหมือแปลง ทำให้เกิดความเสียหายกับหมือแปลง แรงดันที่หมือแปลงที่

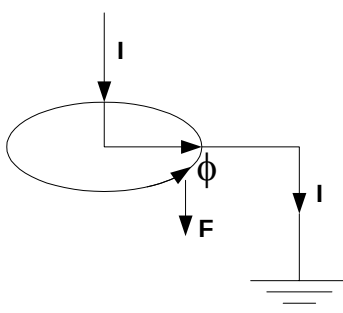
เกิดขึ้นเนื่องจากความชัน เป็นเรื่องที่ยากได้ลำบาก ดังนั้นในการป้องกันต้องพยายามไม่ให้เกิดแรงดันไฟฟ้าที่บริเวณใกล้หม้อแปลง โดยการติดตั้งสายดินเหนือสายส่งในบริเวณที่ใกล้หม้อแปลง

2.3.3 แรงกระทำ กระแสไฟฟ้า

แรงกระทำ กระแสไฟฟ้าทำให้เกิดแรงกระทำสูงๆ ได้ แรงกระทำที่เกิดขึ้นมี 2 อย่าง คือ

2.3.3.1 แรงกระทำที่เกิดขึ้นเนื่องจากการขยายตัวของอากาศรอบๆ ถ้าฟ้าผ่าอย่างรวดเร็ว

2.3.3.2 แรงกระทำที่เกิดขึ้นเนื่องจากกระแสไฟฟ้ากระทำกับสนามแม่เหล็ก กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน ลวดตัวนำที่ออกมา กระแสในแนวดิ่งสร้างสนามแม่เหล็ก ตั้งฉากกับกระแสในแนวนอนตามกฎมือขวาของ Maxwell และทำให้เกิดแรงขึ้นตามทิศทาง ดังรูปที่ 2.7 เหตุผลดังกล่าวนี้เองที่เป็นข้อแนะนำหรือข้อห้ามว่าเมื่อติดตั้งสายนำกระแสไฟฟ้าลงดินควรเดินดิ่งลงดินโดยตรงและไม่ควรหักฉาก



รูปที่ 2.7 แรงกระทำที่เกิดขึ้นเนื่องจากกระแสไฟฟ้ากับสนามแม่เหล็ก

2.3.4 ความร้อน

อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นมีผลต่ออุปกรณ์ไฟฟ้ากำลังคือ ฟ้าผ่าที่มีขนาดแรงดันไม่มาก แต่ช่วงเวลาที่เกิดขึ้น ก็สามารถทำให้อุปกรณ์เสียหายได้เนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์

2.4 การป้องกันและแรงดันไฟฟ้าเกินเนื่องจากฟ้าผ่าที่เกิดบนสาย

การป้องกันแรงดันที่อาจเกิดขึ้นบนสายส่งเป็นสิ่งที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งเพราะสายส่งมีความยาวมากกว่าอุปกรณ์ชนิดอื่น ๆ ในระบบไฟฟ้า มีโอกาสเกิดแรงดันเกินฟ้าผ่าสูง และสายส่งยังเป็นพาหะที่นำแรงดันเกินจากแหล่งหนึ่งไปยังอีกแหล่งหนึ่ง ไปสู่อุปกรณ์สำคัญ ๆ ในระบบ โดยทั่วไป ในการออกแบบขนาดของอุปกรณ์และระบบ จะได้รับการออกแบบให้ทนต่อแรงดันเกินได้ระดับหนึ่ง ส่วนที่เกินกว่านั้นจะให้อุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินทำหน้าที่ตัด ขุด หรือลดทอนลงให้ต่ำพอเพื่อมิให้เกิดความเสียหายกับอุปกรณ์และระบบโดยอาศัยการประสานสัมพันธ์การ

ฉนวนที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพ

2.4.1 การป้องกันแรงดันเกินในระบบสายส่ง สามารถนำ 3 วิธีต่อไปนี้มาร่วมกันได้ [2]

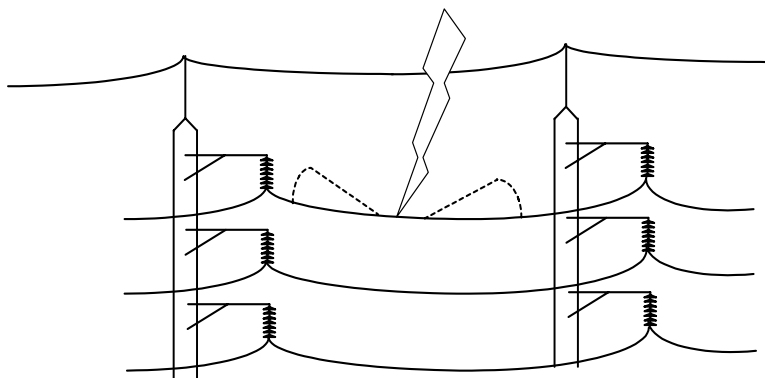
2.4.1.1 การติดตั้งสายดินจึงในอากาศเหนือสายส่งตามแนวความยาวของสายส่ง หรือ สายล่อฟ้ามิให้ฟ้าผ่าที่มีขนาดกระแสสูง ๆ ฝ่าลงสู่สายเฟส ในการออกแบบ สายล่อฟ้าต้องคำนึงถึงมุมชีลด์ (shielding angle) ที่พอเหมาะและค่าความต้านทานดินของ ฐานเสาต้องมีค่าต่ำ ๆ เพื่อป้องกันการเกิดแรงดันเกินคร่อมลูกถ้วยสูงและทำให้เกิดการวาว ไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวนไปยังสายเฟส

2.4.1.2 การใช้ช่องว่างอากาศระหว่างแท่งอิเล็กโตรดหรือที่เรียกกันว่า arcing horn ติดตั้งคร่อมระหว่างอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกัน เช่น ลูกถ้วยฉนวน เมื่อแรงดัน เกิดขึ้นจะเกิดเบรกดาวนที่แกปอากาศระหว่างแท่งอิเล็กโตรด ช่วยมิให้เกิดการวาวไฟตาม ผิวของลูกถ้วยฉนวน ทำให้ลูกถ้วยไม่ได้รับการเสียหาย การเกิดเบรกดาวนของแกป อากาศนี้เป็นการลัดวงจรสู่ดินเพียงชั่วครู่เท่านั้น

2.4.1.3 การติดตั้งกับดักฟ้าผ่าใกล้อุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกัน โดยทั่วไปการ ทำงานของกับดักฟ้าผ่า มีหลักการอยู่ 2 อย่างคือ ต้องสามารถดิสชาร์จประจุผ่านสู่ดินได้ ซึ่งทำให้แรงดันเกินลดลงก่อนผ่านเข้าไปยังอุปกรณ์ที่มันทำหน้าที่ป้องกัน และต้อง สามารถหยุดนำกระแสไฟฟ้าลงสู่ดินเมื่อประจุฟ้าผ่าถูกดิสชาร์จผ่านไปแล้ว หากหยุด ไม่ได้ก็จะมีกระแสไฟฟ้าที่มาจากแหล่งจ่ายพลังงานของระบบไหลติดตามลงไปด้วย มีผล ให้ตัวฉนวนทนต่อพลังงานที่ถูกถ่ายเทเป็นเวลาหลาย ๆ มิลลิวินาทีไม่ได้ และเกิดระเบิดขึ้น

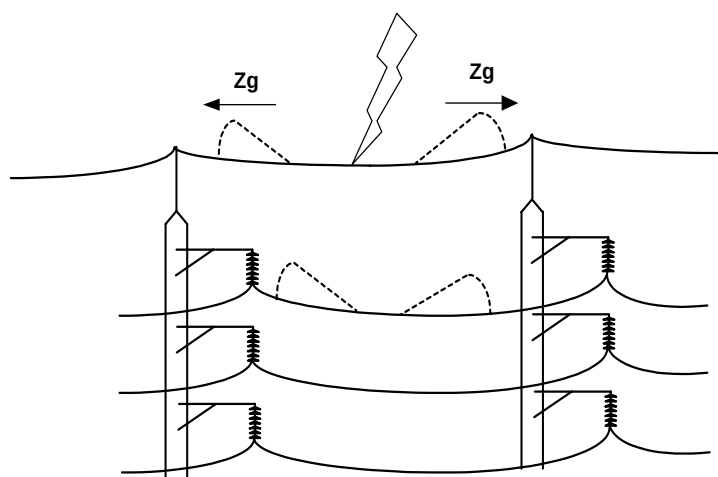
2.4.2 แรงดันไฟฟ้าเกินเนื่องจากฟ้าผ่าที่เกิดบนสายมี 4 แบบ

2.4.2.1 ฟ้าผ่าโดยตรงลงสายส่ง แรงดันไฟฟ้าเกินที่เกิดขึ้นมีค่าสูงมากและ โดยทั่วไปมักเกิดเบรกดาวนกับแนวนของสายส่ง ดังรูปที่ 2.8



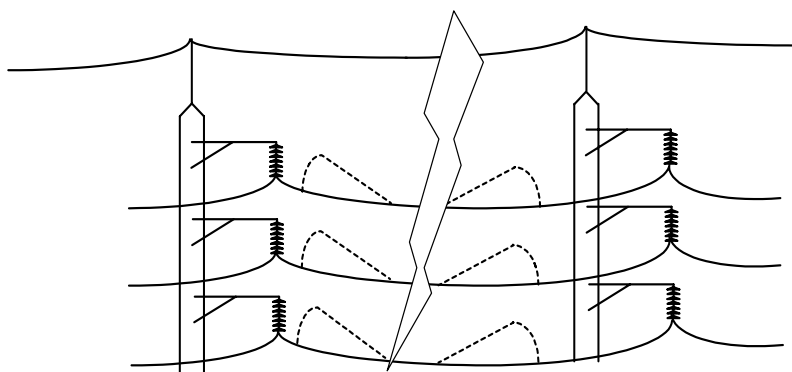
รูปที่ 2.8 ฟ้าผ่าโดยตรงลงสายส่ง

2.4.2.2 ฟผ่าลงสายดิน แรงดันไฟฟ้าเกินที่เกิดขึ้นที่สายเฟสมีค่าประมาณ 20 – 30 เปอร์เซ็นต์ ของแรงดันไฟฟ้าเกินบนสายดิน ดังรูปที่ 2.9 ส่วนมากแรงดันเกินบนสายส่งมักเกิดขึ้นด้วยวิธีการนี้ โดยฟผ่าลงกลางสายดินทำให้เสิร์จอิมพีแดนซ์มีค่า $Z_g \parallel Z_g$



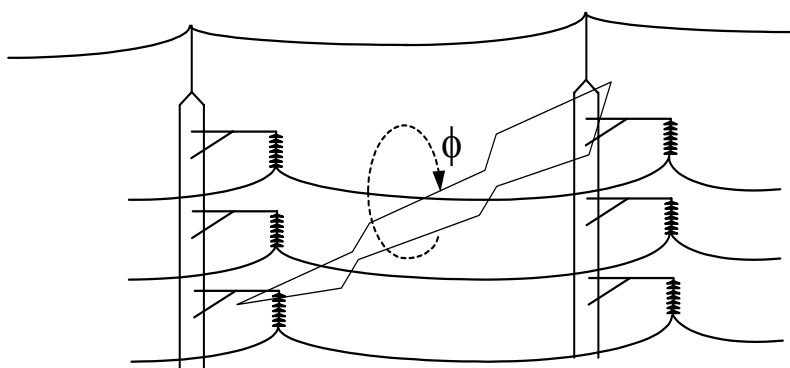
รูปที่ 2.9 ฟผ่าลงสายดิน

2.4.2.3 ฟผ่าลงดิน ฟผ่าลงดินใกล้เคียงกับสายส่งทำให้ประจุบนสายส่งมีอิสระที่จะเคลื่อนตัวทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเกินบนสายส่ง ดังรูปที่ 2.10 ส่วนมากมักมีค่าน้อยกว่า 200 กิโลโวลต์



รูปที่ 2.10 ฟผ่าลงดิน

2.4.2.4 ฟผ่าลงดินเฉียดขนานกับสายส่ง แรงดันไฟฟ้าเกินบนสายส่งในกรณีนี้เกิดเนื่องจากการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็ก ดังรูปที่ 2.11 โอกาสเกิดแบบนี้มีน้อย แต่ถ้าเกิดขึ้นจะมีผลรุนแรงกว่าแบบฟผ่าลงดิน



รูปที่ 2.11 ฟ้าผ่าลงดินเฉียดขนานกับสายส่ง

แรงดันไฟฟ้าเกินเนื่องจากฟ้าผ่าลงที่สายส่งหรือสายเฟส ทำให้แรงดันที่เกิดขึ้นมีค่าสูงมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับฟ้าผ่าที่ลงสายดิน ลงดินข้างเคียง เมื่อฟ้าผ่าขนาดกระแส (I) ลงสายที่มีเสิร์จอิมพีแดนซ์ (Z) ทำให้แรงดันที่เกิดขึ้นมีค่าตามสมการที่ 2.10

$$V = \frac{I_o Z}{2} \quad (2.10)$$

2.5 อัตราการวับไฟตามผิว (Flashover Rate)

สาเหตุสำคัญหนึ่งที่ทำให้เกิดไฟดับ คือการเกิดวับไฟตามผิวถูกด้วยเนื่องจากผลของการเกิดฟ้าผ่าทำให้เกิดลัดวงจร การเกิดวับไฟเกิดได้ 2 ลักษณะ คือการเกิดวับไฟตามผิวย้อนกลับที่เกิดจากฟ้าผ่าที่ยอดเสาหรือผ่าลงที่สายดิน และการเกิดวับไฟตามผิวที่เกิดจากการป้องกันล้มเหลวของสายดิน (Shielding failure flashover) ทำให้ฟ้าผ่าลงสายตัวนำ

การวิเคราะห์แรงดันเกินฟ้าผ่าในระบบสายส่งเพื่อป้องกันและออกแบบการประสานสัมพันธ์การฉนวนให้เหมาะสมสามารถแยกออกเป็น ส่วน ๆ ได้ดังนี้

2.5.1 รูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่า (Lightning impulse)

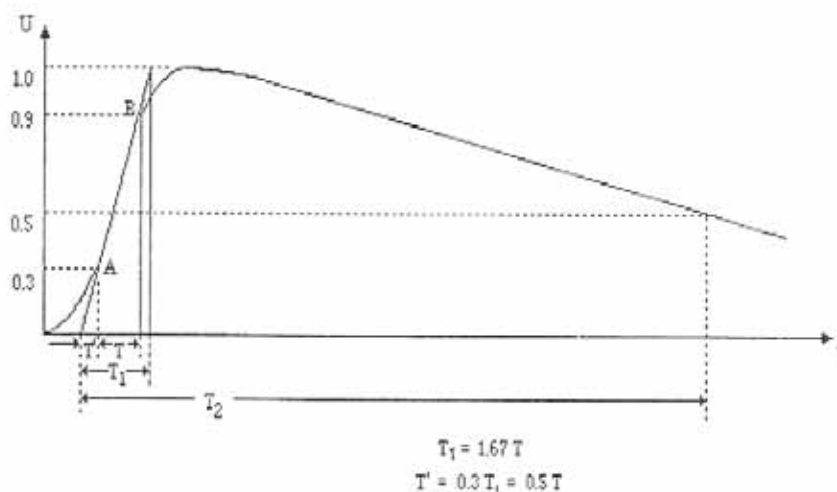
รูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าอาจมีรูปร่างแตกต่างกันไป ตามมาตรฐาน IEC 60 – 1 [3] กำหนดให้รูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าเต็ม เป็นดังรูปที่ 2.12 พารามิเตอร์ต่างๆ คำนวณได้ดังนี้

2.5.1.1 ค่ายอด คือ ค่ายอดของรูปคลื่นเต็ม

2.5.1.2 เวลาคู่คลื่น T มีค่าเท่ากับ $1.67T$ โดย T เป็นผลต่างของเวลาที่ขนาดของแรงดันมีค่าเท่ากับ 30 % ของค่ายอด กับเวลาที่ขนาดของแรงดันมีค่าเท่ากับ 90 % ของค่ายอด ทั้งนี้สมมุติว่าจุดเริ่มต้นเป็นจุดที่แรงดันมีค่าเป็นศูนย์โดยคำนวณจากเส้นตรงที่ผ่านจุด 2 จุด

ที่นำมาคำนวณค่า T ดังกล่าวเรียกว่าจุดเริ่มต้นเสมือน (virtual origin, O_1)

2.5.1.3 เวลาถึงถึงค่ายอด T_2 เป็นเวลาจากจุดเริ่มต้นเสมือนผ่านค่ายอด จนถึงจุดที่ขนาดของแรงดันมีค่าเท่ากับ 50% ของค่ายอด



รูปที่ 2.12 รูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าเต็ม

2.5.2 โอกาสการเกิดฟ้าผ่า

ฟ้าผ่าเป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติที่เกิดขึ้นในบรรยากาศ อันเป็นผลของการคายประจุหรือดิสชาร์จของประจุไฟฟ้าที่สะสมอยู่ในก้อนเมฆ การสะสมของประจุที่มีขั้วต่างกันเป็นผลให้เกิดสนามไฟฟ้าระหว่างกลุ่มประจุเหล่านั้น ถ้าประจุสะสมรวมกันมีปริมาณมากขึ้น ทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นเกินค่าวิกฤติความคงทนของอากาศต่อแรงดันไฟฟ้า ก็จะมีการดิสชาร์จของประจุขึ้น อันเป็นจุดเริ่มต้นของการนำไปสู่การเกิดการดิสชาร์จเบรกดาวน์ขึ้น ดิสชาร์จอาจเกิดขึ้นระหว่างก้อนเมฆ หรือระหว่างก้อนเมฆกับพื้นโลกก็ได้ ในกรณีที่เกิดดิสชาร์จขึ้นระหว่างเมฆกับพื้นโลก จะเป็นกรณีที่เกิดฟ้าผ้านั่นเอง [4] Armstrong-Whitehead [5] ได้นำเสนอโอกาสการเกิดฟ้าผ่า (probability density function) เป็นตามสมการที่ 2.11

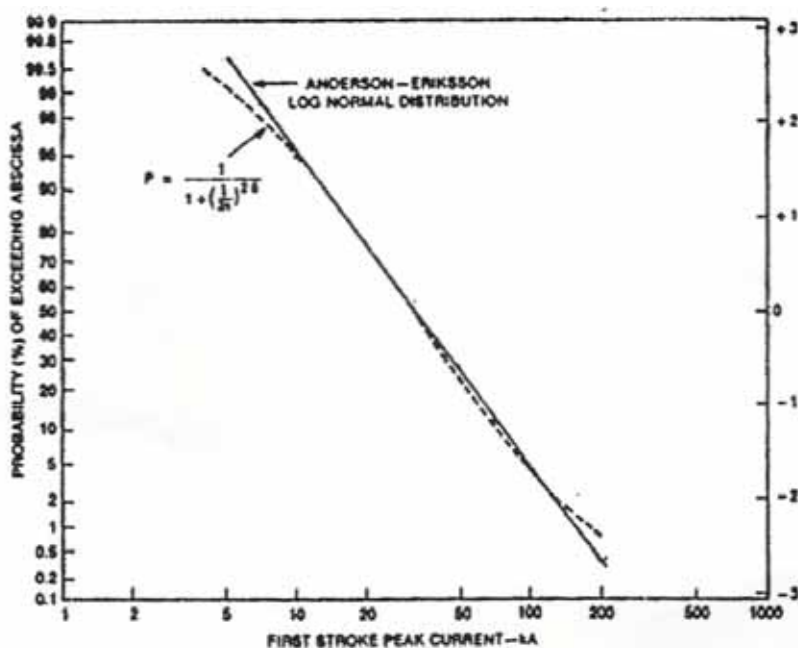
$$P(I) = 0.0475e^{\left(-\frac{I}{20}\right)} + 0.001e^{\left(-\frac{I}{50}\right)} \quad (2.11)$$

เมื่อ I คือ ค่ายอดกระแสฟ้าผ่า (kA)

โอกาสการเกิดฟ้าผ่าที่มีค่ากระแสฟ้าผ่าเกินกว่ากระแส I_0 อาจหาได้จากสมการ 2.12 ประมาณค่าของ IEEE Working Group [6] ซึ่งมีพื้นฐานมาจากข้อมูลของ Anderson และ Eriksson [7] ดังรูปที่ 2.13

$$P(I > I_0) = \frac{I}{I + \left(\frac{I_0}{3I}\right)^{2.6}} \quad (2.12)$$

เมื่อ I_0 คือ ค่ากระแสฟ้าวิกฤติ (kA)



รูปที่ 2.13 โอกาสการเกิดฟ้าผ่าที่มีค่ากระแสฟ้าผ่าค่ายอดเกินกว่า I_0 สำหรับฟ้าผ่าชั่วลบ

2.5.3 จำนวนครั้งที่ฟ้าผ่าลงสู่ระบบสายส่ง

กำหนดให้ N_g เป็นความหนาแน่นของจำนวนครั้งที่ฟ้าผ่าลงบนพื้นดิน (ground flash density) จำนวนครั้งต่อ 1 ตารางกิโลเมตรต่อปี ซึ่งเป็นข้อมูลที่ได้จากประสบการณ์ มีรูปแบบทั่วไปเป็นตามสมการที่ 2.13

$$N_g = k \cdot TD^a \quad (2.13)$$

เมื่อ TD คือ จำนวนวันที่เกิดฟ้าผ่าต่อปี (thunderstorm day per year หรือ keraunic level) มีผู้เสนอค่าคงที่ k และ a มากมาย Eriksson [8] เสนอสมการที่ 2.14 ของ N_g ซึ่งได้รับการยอมรับจากทั้ง CIGRE และ IEEE [9] คือ

$$N_g = 0.04 \cdot TD^{1.25} \quad (2.14)$$

นอกจากนี้ IEEE Working Group [10] ยังได้เสนอสมการที่ 2.15

$$N_g = 0.05 \cdot TH \quad (2.15)$$

เมื่อ TH คือ จำนวนชั่วโมงที่เกิดฟ้าผ่าต่อปี (thunderstorm hour per year)

สายส่งที่ทอดแนวยู่เหนือพื้นดินเป็นระยะสูง h เมตร จะมีโซนบนพื้นดินรอบ ๆ แนวสายที่ฟ้าผ่าเข้าสู่โซนนี้แล้วก็จะผ่าลงสู่ระบบสายส่งทุกครั้ง แต่ฟ้าผ่านอกโซนนี้จะลงสู่พื้นดินทุกครั้ง รูปที่ 2.14 แสดงถึงลักษณะของโซนดังกล่าวนี้ โดยมองจากทางด้านกว้างออกไปจากเสาเป็นระยะ W และความกว้าง b ซึ่งจะมีค่าเท่ากับศูนย์เมื่อมีจุดสูงสุดเป็นจุดยอดเดียว เช่น การใช้สายดิน 1 เส้น ในทางปฏิบัติค่า b น้อยกว่า ค่า h มาก ช่วงกว้าง W นี้เรียกว่า right-of-way width หรือ shadow width Whitehead [11] ได้สร้างสมการที่ 2.16 หาค่า W (เมตร) ไว้ดังนี้

$$W = 4h^{1.09} + b \quad (2.16)$$

เมื่อ h คือ ความสูงเฉลี่ยของสายเฟส (เมตร)

b คือ ระยะห่างระหว่างสายล่อฟ้า (เมตร)

พารามิเตอร์ h ในสมการที่ 2.15 หาได้จากสมการที่ 2.17

$$h_{av} = h_{ph} \frac{2}{3} S \quad (2.17)$$

เมื่อ h_{av} คือ ความสูงเฉลี่ยของสายเฟส (เมตร)

h_{ph} คือ ความสูงเฉลี่ยของสายเฟสที่เสา (เมตร)

S คือ ระยะหย่อนของสาย (เมตร)

Eriksson [8] เสนอสมการที่ 2.18 ของระยะ W เป็น

$$W = 28h_t^{0.6} + b \quad (2.18)$$

เมื่อ h_t คือ ความสูงของเสา (เมตร)

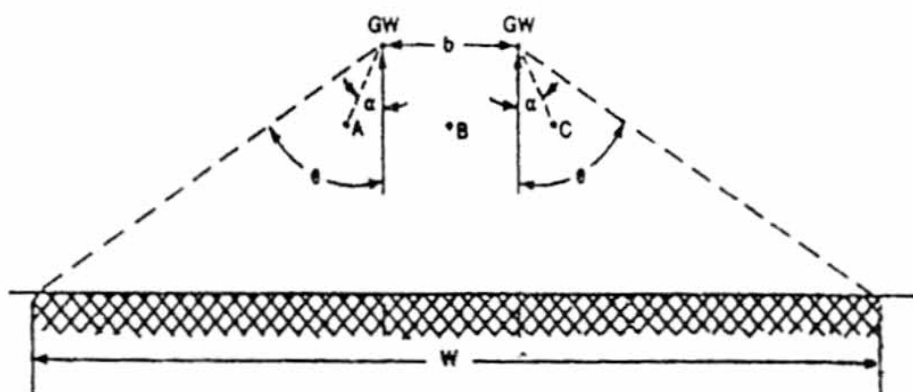
สมการของ Eriksson ขึ้นกับความสูงของเสาเท่านั้น แต่สมการของ Whitehead ขึ้นกับความสูงเฉลี่ยของสายเฟส ซึ่งเป็นฟังก์ชันของทั้งความสูงของสายเฟสที่เสาและระยะหย่อนของสาย

จากสมการของ N_g และ W สามารถกำหนดสมการที่ 2.19 ของจำนวนครั้งที่ฟ้าผ่าลงสู่ระบบสายส่งต่อระยะทาง 100 กิโลเมตร (N_L) พื้นที่ของแนวสายส่งยาว 100 กิโลเมตร และกว้าง W เมตร คือ $\frac{W}{10} km^2$ ดังนั้น

$$N_L = N_g \cdot \frac{W}{10} \quad (2.19)$$

จากสมการ 2.18 และสมการ 2.19 จะได้สมการ 2.20

$$N_L = \frac{N_g}{10} (28h_t^{0.6} + b) \quad (2.20)$$



รูปที่ 2.14 right-of way width หรือ shadow width (W)

IEEE Standard กำหนดสมการที่ 2.21 ของจำนวนครั้งที่ฟ้าผ่าลงสู่ระบบสายส่งต่อระยะทาง 100 กิโลเมตร (N_L) มีค่าเท่ากับ [6]

$$N_L = \frac{N_g}{10} (28h^{0.6} + S_g) \quad (2.21)$$

เมื่อ h คือ ความสูงของสายดินป้องกัน (เมตร)

S_g คือ ระยะห่างระหว่างสายดินป้องกันในแนวราบ (เมตร)

N_g คือ ความหนาแน่นของจำนวนครั้งที่ฟ้าผ่าลงบนพื้นดิน

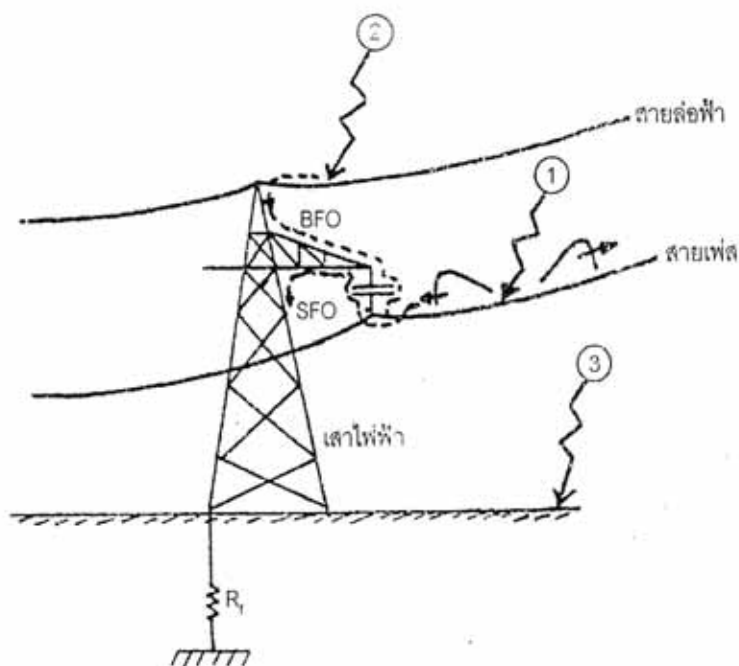
2.5.4 ไฟฟ้าในระบบสายส่ง

การวิเคราะห์แรงดันเกินไฟฟ้า จำเป็นต้องกำหนดองค์ประกอบพื้นฐานและค่าพารามิเตอร์ของระบบสายส่งดังรูปที่ 2.15 แสดงองค์ประกอบพื้นฐานของระบบซึ่งมีสายชีลด์ สายเฟส เสาไฟฟ้า ลูกถ้วยฉนวน และความต้านทานดินของฐานเสา และแสดงการเกิดไฟฟ้าลงบนระบบสายส่งในกรณีต่างๆ ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 3 กรณี คือ

2.5.4.1 กรณีที่ 1 ไฟฟ้าลงที่สายเฟส แม้มีสายล่อฟ้าเป็นระบบป้องกัน อาจมีการชีลด์ลัมเหลวเกิดขึ้นทำให้แรงดันของสายเฟสเพิ่มขึ้นอย่างมาก หากลูกถ้วยฉนวนไม่สามารถทนต่อแรงดันสูงระดับนี้ได้ ก็จะเกิดการรวบไฟตามผิวลูกถ้วยฉนวนไปยังเสาและดินที่มีความต้านทานดินของฐานเสา R_F

2.5.4.2 กรณีที่ 2 ไฟฟ้าที่สายล่อฟ้าที่อยู่เหนือสายเฟส ส่วนหนึ่งของกระแสไฟฟ้าจะไหลลงไปตามเสา ส่วนที่เหลือจะไหลเข้าไปในสายล่อฟ้า กระแสส่วนที่ไหลลงไปตามเสานี้จะไหลไปยังดินที่ฐานของเสาไฟฟ้า ผ่านความต้านทานดินของฐานเสา แล่สะท้อนกลับไปยังยอดของเสา ทำให้เสาไฟฟ้ามีศักย์ไฟฟ้าที่สูงขึ้น แรงดันคร่อมลูกถ้วยฉนวน คือ ผลต่างระหว่างแรงดันของเสาไฟฟ้ากับแรงดันของสายเฟส ในกรณีที่ฟ้าผ่ารุนแรง ก็อาจเกิดการแลบข้ามลูกถ้วยกลับไปยังสายเฟสทำให้เกิดเสิร์จในสายเฟสได้

2.5.4.3 กรณีที่ 3 ไฟฟ้าลงสู่ดิน เกิดแรงดันเหนี่ยวนำในสายเฟส เนื่องจากค่าแรงดันเกินที่วัดได้ แทบจะไม่มีโอกาสที่จะมีค่าเกิน 300 kV [12] แรงดันเหนี่ยวนำนี้นี้จึงมีผลเพียงเล็กน้อยเท่านั้นในระดับแรงดันของระบบสายส่ง



รูปที่ 2.15 ตำแหน่งไฟฟ้า และ การเกิดการชีลด์ลัมเหลวและแลบข้ามกลับ

เนื่องจากในกรณีที่ 3 มีผลไม่รุนแรงเมื่อเทียบกับกรณีอื่นในการวิเคราะห์หาโอกาสที่จะเกิดความผิดปกติจากฟ้าผ่าของระบบสายส่ง จึงพิจารณาจากกรณีฟ้าผ่าลงบนสายเฟสและกรณีฟ้าผ่าลงสู่สายล่อฟ้า

2.5.5 ฟ้าผ่าลงบนสายเฟส

แรงดันเกินบนสายเฟสที่จุดฟ้าผ่าสามารถคำนวณได้จากกระแสฟ้าผ่าและเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายเฟส กระแสฟ้าผ่ามีวงจรสมมูลเป็นแหล่งจ่ายกระแส ที่มีค่าอิมพีแดนซ์ มีโหนดเป็นเสิร์จอิมพีแดนซ์สมมูล ดังนั้นแรงดันเกินที่จุดฟ้าผ่าในรูปที่ 2.16 จึงเป็นตามสมการที่ 2.22

$$E = \frac{I_0 \cdot Z_{eq} \cdot Z_0}{(Z_0 + Z_{eq})} = \frac{I_0}{\left(1 + \frac{Z_{eq}}{Z_0}\right)} \quad (2.22)$$

เมื่อ E คือ แรงดันเกินที่ฟ้าผ่า (kv)

I_0 คือ กระแสฟ้าผ่า (Ka)

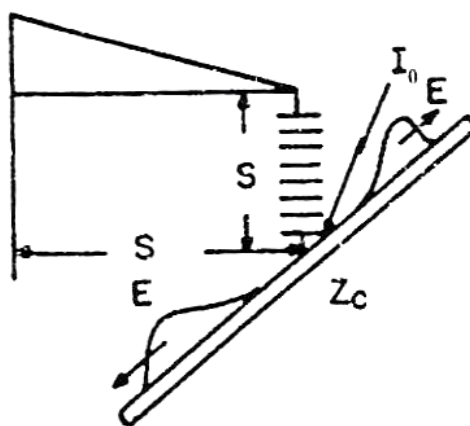
Z_{eq} คือ เสิร์จอิมพีแดนซ์สมมูล (Ω)

Z_0 คือ อิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายกระแสฟ้าผ่า (Ω)

ถ้า $Z_0 \gg Z_{eq}$; $V = I_0 Z_{eq}$ และในกรณีนี้ $Z_{eq} = \frac{Z_c}{2}$ ดังนั้นจะได้ตามสมการ 2.23

$$V = \frac{I Z_c}{2} \quad (2.23)$$

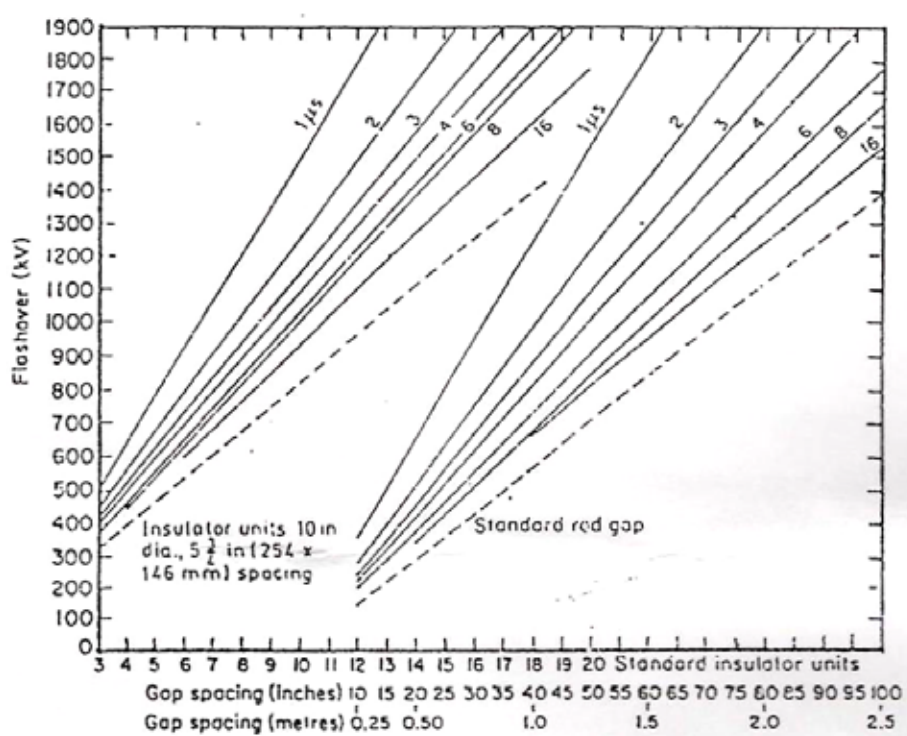
เมื่อ Z_c คือ เสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายเฟส



รูปที่ 2.16 วงจรของฟ้าผ่าบนสายเฟส

สมการที่ (2.23) แสดงถึงการถ่ายเทพลังงานของกระแส (I_0) ไปข้างละครั้งหนึ่ง ทำให้แรงดันเกิน (E) เคลื่อนที่ออกไปทางซ้ายและขวาของสายเฟส แรงดันเกินไฟฟ้าที่เดินทางมาถึงขั้วลู่ด้วยฉนวนที่อยู่ใกล้ตำแหน่งไฟฟ้า จะเกิดการรวบไฟตามผิวฉนวน หรือ เบรกดาวน์ในแกปอากาศ การติดตั้ง arcing horn ต่อเมื่อแรงดันเกินนั้นมีค่าสูงกว่าค่าแรงดันวิกฤติที่ทำให้เกิดการรวบไฟตามผิวลู่ด้วยฉนวนหรือเกิดการเบรกดาวน์ของแกปอากาศ (critical flashover voltage, CFO) ซึ่งมีค่าดังรูปที่ 2.17 ดังนั้นกระแสผ่าวิกฤติที่ทำให้เกิดการแลบข้ามได้จึงหาได้จากสมการที่ 2.24

$$I_c = \frac{2 \cdot CFO}{Z_c} \quad (2.24)$$



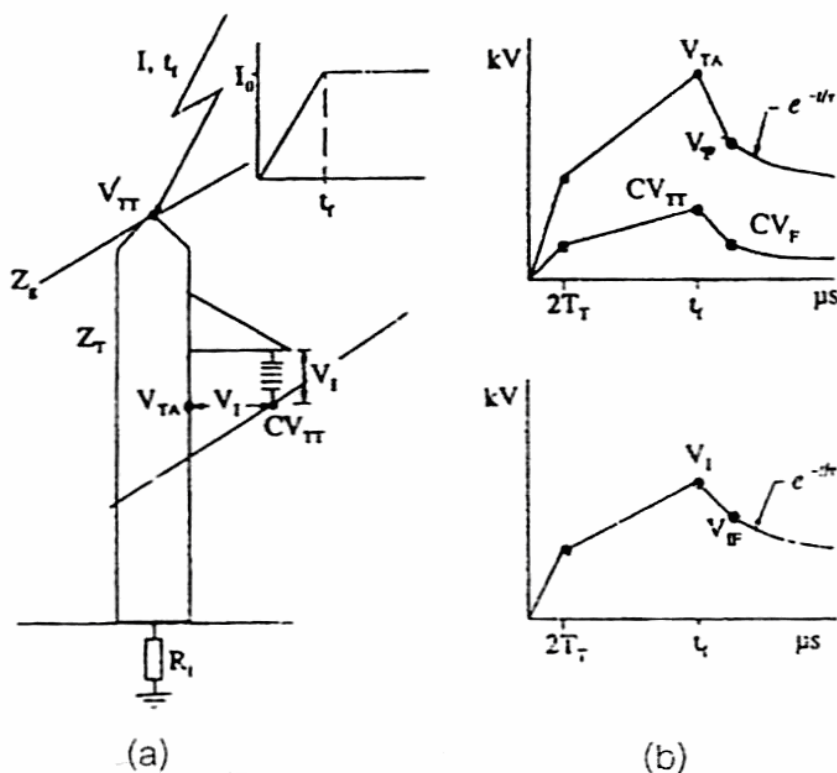
รูปที่ 2.17 แรงดันแลบข้ามลู่ด้วยไฟฟ้า

จากรูปที่ 2.17 เป็นการแสดงแรงดันแลบข้ามลู่ด้วยไฟฟ้า (254×146 mm) และช่องว่างระหว่างแท่งอิเล็กโตรด rod-rod (เวลาบนเส้นกราฟเป็นเวลาที่ใช้ในการเกิดการแลบข้าม แรงดันที่ใช้เป็น อิมพัลส์ไฟฟ้ามาตรฐาน 1.2/50 μ s สำหรับเส้นประเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ทุก ๆ กราฟอยู่ที่สภาวะอากาศมาตรฐาน 20°C, 1013 mbar, ความชื้นสัมบูรณ์ 11g/m³)

2.5.6 ไฟฟ้าลงบนสายล่อฟ้า

ฟ้าผ่าลงบนสายล่อฟ้าทำให้เกิดแรงดันเกินที่ยอดเสา และทำให้เกิดเสิร์จเดินทางแยกเป็น 2 ทาง คือ เดินทางลงไปตามเสา และเดินทางไปตามสายล่อฟ้าทั้ง 2 ด้าน โดยในกรณีแรกจะทำให้เกิดการสะท้อนของเสิร์จที่จุดต่อระหว่างฐานเสากับความต้านทานดินของฐานเสา ส่วนกรณีที่สองจะทำให้เกิดการสะท้อนของเสิร์จที่ยอดเสาด้านถัด ๆ ไป Hileman [9] ได้เสนอกระบวนการคำนวณค่าแรงดันเกินที่เกิดจากฟ้าผ่าลงบนสายล่อฟ้า โดยพิจารณาหาแรงดันที่ยอดเสา ทั้งในกรณีที่คิดผลของเสิร์จที่สะท้อนที่ฐานเสา และกรณีที่คิดของเสิร์จที่สะท้อนมาจากเสาด้านถัด ๆ ไป

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่าการแลกเปลี่ยนกลับของเสิร์จฟ้าผ่าที่เกิดจากฟ้าผ่าลงสายล่อฟ้า นั้นเกิดขึ้นได้เมื่อแรงดันเกินที่ตกคร่อมลูกถ้วยฉนวนมีค่าสูงเกินกว่าที่ถูกด้วยฉนวนจะทนได้ แรงดันเกินที่ตกคร่อมลูกถ้วยฉนวนดังรูปที่ 2.18 โดยค่าตัวแปรต่างๆ สามารถคำนวณได้ โดยใช้กระบวนการคำนวณ



รูปที่ 2.18 แรงดันที่เสา และแรงดันคร่อมลูกถ้วยฉนวน

$$V_{TT} = (K_{SP}K_{TT})I \quad (2.25)$$

$$V_{TA} = (K_{SP}K_{TA})I \quad (2.26)$$

$$V_F = R_e I \quad (2.27)$$

และกระแสที่ไหลผ่านความต้านทานดินของฐานเสาตามสมการที่ 2.27

$$I_R = \frac{R_e}{R_i} I \quad (2.28)$$

เมื่อ

$$K_{TT} = R_e + \alpha_T Z_T \frac{T_T}{t_t}$$

$$K_{TA} = R_e + \alpha_T Z_T \frac{T_A}{t_t} \quad (2.29)$$

$$K_{SP} = 1 - \alpha_R (1 - \alpha_T) \left[\left(1 - 2 \frac{T_s}{t_t} + \alpha_R \alpha_T \left(1 - 4 \frac{T_s}{t_t} \right) + (\alpha_R \alpha_T)^2 \left(1 - 6 \frac{T_s}{t_t} \right) + \dots \right] \right]$$

จากสมการที่ 2.28

$$R_e = \frac{Z_g R_i}{Z_g + 2R_i} \quad \alpha_r = \frac{Z_T - R_i}{Z_T + R_i} = \frac{Z_g - 2R_i}{Z_g + 2R_i} \quad \alpha_r = \frac{Z_g}{Z_g + 2R_i} \quad (2.30)$$

จากรูปที่ 2.18 ส่วนหางคลื่นของแรงดันอันเป็นผลที่เกิดจากคลื่นสะท้อนจากเสาต้นถัด ๆ ไปจากเสาต้นที่ฟ้าผ่านั้นประมาณได้จากค่าคงที่เวลา τ [9] ตามสมการที่ 2.30

$$\tau = \frac{Z_g}{R_i} T_s \quad (2.31)$$

โดยที่สมการของแรงดันส่วนหางคลื่นนี้คือ

$$E_{TT} = V_F e^{-\frac{(t-t_t)}{\tau}} \quad (2.32)$$

ตัวแปรต่าง ๆ ในรูปที่ 2.18 และสมการ 2.25 - 2.32 มีความหมายดังนี้

- t_f : เวลาหน้าคลื่นของกระแสฟ้าผ่า (μs)
 C : แฟกเตอร์คัปปลิง
 Z_T : เสรีจิมพีแดนซ์ของเสา (Ω)
 Z_G : เสรีจิมพีแดนซ์ของสายล่อฟ้า (Ω)
 T_T : เวลาที่เสรีจิมเดินทางในเสา (μs)
 T_A : เวลาที่เสรีจิมเดินทางในเสาไปยังตำแหน่ง A ไค (μs)
 T_S : เวลาที่เสรีจิมเดินทางในสายล่อฟ้าจากยอดเสาหนึ่งถึงอีกยอดเสาหนึ่ง (μs)
 I_0 : ค่ายอดของกระแสฟ้าผ่า (kA)
 I_R : กระแสที่ไหลผ่านความต้านทานดินของฐานเสาดันที่ถูกฟ้าผ่า (kA)
 R_i : ความต้านทานดินของฐานเสา เมื่อมีกระแสเสรีจิมค่าสูงไหลผ่าน (Ω)
 τ : ค่าคงที่เวลาของหางคลื่น (μs)

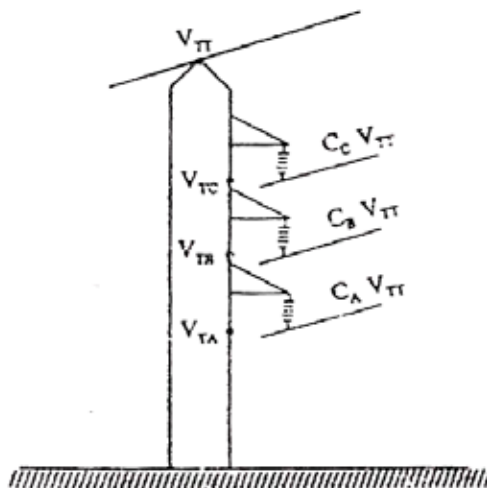
แรงดันเสรีจิมในสายล่อฟ้าหนึ่งขบวนทำให้เกิดแรงดันเสรีจิมที่สายเฟส มีค่าเท่ากับค่าแฟกเตอร์คัปปลิง (coupling factor) C คูณกับค่าของแรงดันเสรีจิมในสายล่อฟ้าในรูปที่ 2.18 แรงดัน V_{TA} เป็นแรงดันบนเสา ที่ตำแหน่ง ซึ่งอยู่ตรงข้ามกับสายเฟสพอดิ ดังนั้นแรงดันสูงสุดที่คร่อมลูกถ้วยฉนวน V_I คือ

$$V_I = I_0 (K_{TA} - CK_{TT}) K_{SP} \quad (2.33)$$

โดยค่า แฟกเตอร์คัปปลิงสามารถหาได้จากภาคผนวก ข

เมื่อพิจารณาสายทั้ง 3 เฟส ที่มีแฟกเตอร์คัปปลิงของเฟส A,B และ C เป็น C_A, C_B และ C_C ตามลำดับดังรูปที่ 2.19 จะได้แรงดันคร่อมลูกถ้วยฉนวนของทั้ง 3 เฟส เป็น

$$\begin{aligned}
 V_{IA} &= (K_{TA} - C_A K_{TT}) K_{SP} I \\
 V_{IB} &= (K_{TB} - C_B K_{TT}) K_{SP} I \\
 V_{IC} &= (K_{TC} - C_C K_{TT}) K_{SP} I
 \end{aligned} \quad (2.34)$$



รูปที่ 2.19 สายส่ง 3 เฟสที่มีแฟกเตอร์คัปปลิงและแรงดันยอดเสาแตกต่างกัน
และเมื่อพิจารณาแรงดันของระบบสายส่ง ถ้าให้แรงดันเฟสค่ายอดคือ V_{LN} จะได้

$$\begin{aligned} V_{IA} &= (K_{TA} - C_A K_{TT}) K_{SP} I + V_{LN} \sin(\omega t) \\ V_{IB} &= (K_{TB} - C_B K_{TT}) K_{SP} I + V_{LN} \sin(\omega t - 120^\circ) \\ V_{IC} &= (K_{TC} - C_C K_{TT}) K_{SP} I + V_{LN} \sin(\omega t + 120^\circ) \end{aligned} \quad (2.35)$$

ดูด้วยจนวนจะทนต่อแรงดันเกินไม่ได้เมื่อแรงดันคร่อมดูด้วยจนวนมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ CFO ของจนวน

2.6 อัตราการวาวไฟตามผิวย้อนกลับ (Back flashover Rate)

ในระบบสายส่งจะมีเสาเพื่อใช้ในการพาดผ่านของสายส่งและสายล่อฟ้าเป็นช่วงๆ ซึ่งในแต่ละช่วงอาจจะมีค่าความต้านทานดินแตกต่างกัน สมการที่ใช้ในการคำนวณอัตราการวาวไฟตามผิวย้อนกลับ ได้จากความสัมพันธ์ของสถิติกระแสฟ้าผ่าที่เกินค่ากระแสวิกฤตและความหนาแน่นฟ้าผ่าที่ผ่าลงระบบสายส่ง [6] ที่มีผลในแต่ละระยะของช่วงเสาส่งตามสมการ 2.36

$$BFR = N_L P(I) \quad (2.36)$$

เมื่อ $P(I)$ คือ ความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามีค่าเกินกว่ากระแสวิกฤต
 N_L คือ จำนวนครั้งที่ฟ้าผ่าลงสู่ระบบสายส่งต่อระยะทาง

ในการคำนวณหาค่าอัตราการวบไฟตามผิวย้อนกลับ ในแต่ละช่วงเสาส่งแล้วยังสามารถคำนวณหาค่ารวมอัตราการวบไฟตามผิวย้อนกลับโดยเฉลี่ย ตามระยะทางโดยรวมในแต่ละระยะที่ต้องการตามสมการ 2.37

$$BFR = \frac{\sum BFR_n L_n}{\sum L_n} \quad (2.37)$$

เมื่อ BFR คือ ค่า BFR รวมโดยเฉลี่ย
 BFR_n คือ ค่า BFR ของสายช่วงที่ n
 L_n คือ ค่าความยาวสายช่วงที่ n

บทที่ 3

โปรแกรมและแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์

3.1 บทนำ

การหาค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย ระยะห่างการปักเสาพาดสายไฟฟ้าและค่าความต้านทานดินที่ฐานเสา จากค่ากระแสฟ้าผ่า ในกรณีที่ฟ้าผ่าลงที่สายดินบนยอดเสาส่งด้วยโปรแกรม ATP-EMTP แบบจำลองต่างๆ การวิเคราะห์สภาวะทรานเซียนต์ของ EMTP ทำในโดเมนเวลา ทำให้สามารถนำผลมาใช้ในการคำนวณค่าตัวแปรต่างๆ ที่ต้องการได้ โดยคำนวณผ่าน TACS หรือ MODELS ก็ได้ หรืออาจสร้างองค์ประกอบจำลองจากแบบต่างๆ ซึ่ง TACS และ MODELS มีหลักการทำงานและความสามารถดังนี้

3.1.1 TACS

TACS ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อเป็นองค์ประกอบจำลองแบบบล็อกไดอะแกรม โดยผู้ใช้งานสามารถนำฟังก์ชันสำเร็จรูปที่มีการสร้างเอาไว้ใน EMTP อยู่แล้วมาประกอบกันเพื่อใช้ได้ทันที แต่จะถูกจำกัดอยู่ที่ไม่ได้รับการออกแบบมาเพื่อสร้างอัลกอริทึม จึงค่อนข้างลำบากในการออกแบบวงจรควบคุมในลักษณะที่ต้องใช้อัลกอริทึมที่ซับซ้อน

3.1.2 MODELS

MODELS เป็นภาษาที่ใช้ในการเขียนโปรแกรม ที่สร้างขึ้นมาเพื่อใช้ร่วมงานกับงานซิมูเลชันที่ใช้กับโดเมนเวลา ใช้เป็นเครื่องมือสำหรับระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาและมีความซับซ้อนสูง ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อ

3.1.2.1 ใช้เป็นเครื่องมือในการพัฒนาแบบจำลองของวงจรไฟฟ้าหรือวงจรควบคุมที่ไม่สามารถสร้างได้โดยง่ายด้วยองค์ประกอบที่มีอยู่แล้วใน EMTP และ TACS

3.1.2.2 มีความยืดหยุ่นในการใช้เป็นภาษาในการเขียนโปรแกรมอย่างสมบูรณ์ โดยไม่ต้องติดต่อกับ EMTP อีกในระหว่างกระบวนการคำนวณด้วยโปรแกรม

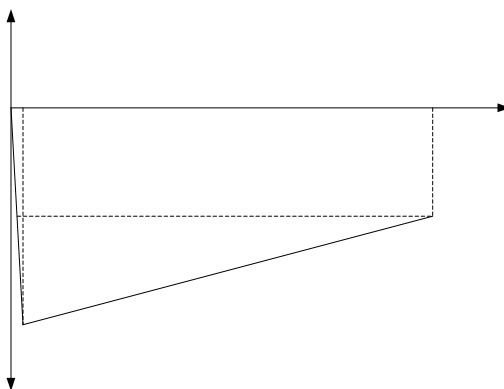
3.1.2.3 สามารถกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับองค์ประกอบวงจรไฟฟ้าได้

3.1.2.4 เป็นโปรแกรมมาตรฐานที่เป็นตัวเชื่อมต่อกับ EMTP ในรูปของแรงดันกระแสและสัญญาณควบคุม เป็นตัวแปรนำไปใช้ใน MODELS เพื่อวิเคราะห์สัญญาณที่วัดได้จากวงจรไฟฟ้า

3.2 การจำลองอุปกรณ์ต่างๆในระบบ

3.2.1 แบบจำลองเสิร์จฟ้าผ่า

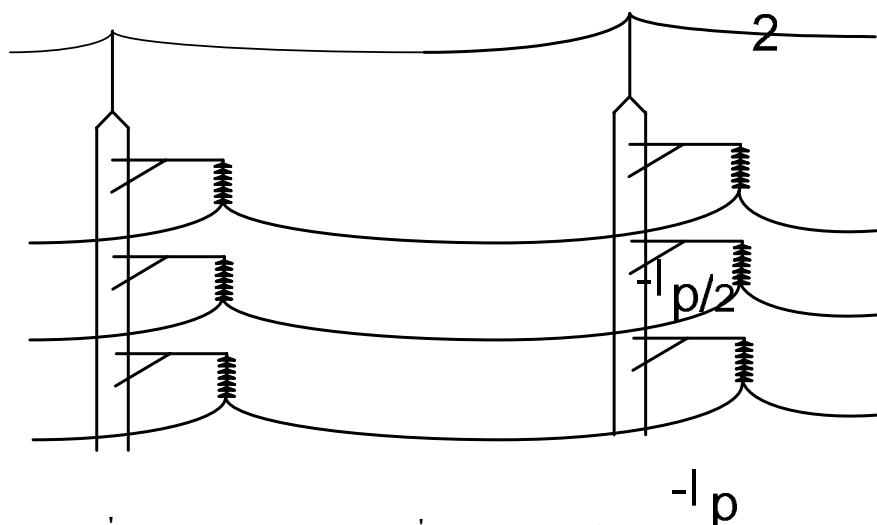
จากการรวบรวมข้อมูลฟ้าผ่า พบว่าประมาณร้อยละ 80 ที่ผ่าลงสู่พื้นโลกเป็นฟ้าผ่าลบ ร้อยละ 20 เป็นฟ้าผ่าบวก [4] ดังนั้นแบบจำลองเสิร์จฟ้าผ่าที่ใช้จึงกำหนดให้เป็นแหล่งจ่ายกระแส อิมพัลส์ชั่วพล 2/70 ไมโครวินาที [20] ต่อขนาดอยู่กับเสิร์จอิมพีแดนซ์ของลํ้าฟ้าผ่าขนาด 400 โอห์ม รูปคลื่นของแหล่งจ่ายกระแสอิมพัลส์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ มีค่าเพิ่มขึ้นและลดลงแบบเชิงเส้นดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 รูปคลื่นของแหล่งจ่ายกระแสอิมพัลส์ที่ใช้ในการวิเคราะห์

3.2.2 แบบจำลองสายส่ง

แบบจำลองสายส่งที่ใช้เป็นแบบจำลองพารามิเตอร์ขึ้นกับความถี่ของ J. Marti จำลองสายส่งวงจรเดียวกันในแนวดิ่ง ประกอบด้วยสายเฟส 3 เส้น และสายล่อฟ้า 1 เส้น ดังแสดงในรูปที่ 3.2 โดยแต่ละช่วงความยาวสาย สามารถคำนวณหาความถี่ได้จากสมการที่ 3.1 [13]



รูปที่ 3.2 การจัดวางสายเฟสและสายล่อฟ้าของระบบ 115 kV

$$f = \frac{3 \times 10^8}{4l_{Line}} \quad (3.1)$$

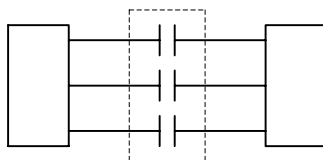
เมื่อ l_{Line} คือ ความยาวสาย (m)

ซึ่งแบบจำลองสายส่งและคอนที่ใช้ในการศึกษา [14] ดังแสดงในรูปที่ 3.3

เมื่อ Z_A คือ แบบจำลองของคอน (Ω)

Z_L คือ แบบจำลองของสาย (Ω)

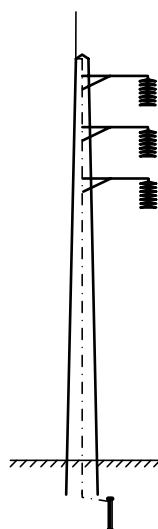
C คือ แบบจำลองของลูกถ้วย (F)



รูปที่ 3.3 แบบจำลองสายส่งและคอนที่ใช้ในการศึกษา

3.3.3 แบบจำลองเสาไฟฟ้า

ตามมาตรฐานการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค กำหนดใช้เสาคอนกรีตที่มีความสูง 22 เมตร สายล่อฟ้าจะทำการต่อลงดิน โดยผ่านสายตัวนำลงดินที่ฝังในเสาคอนกรีตลงไปยังระบบรากสายดิน ตัวนำลงดินจะเป็นโลหะทองแดงชนิดแท่งมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 0.016 เมตร มีความยาว 2 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.4



Z_A

รูปที่ 3.4 โครงสร้างเสาและการต่อลงดินของระบบ 115 kV

การหาค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของเสาคอนกรีตหาได้จากสมการที่ 3.2 แยกเป็นส่วนๆ ตามความยาว [14] ดังแสดงในรูปที่ 3.5

$$Z_{Tk} = 60 \ln \left(\sqrt{2} \frac{2h_k}{r_{ek}} - 2 \right) \quad (3.2)$$

เมื่อ	Z_{Tk}	คือ เสิร์จอิมพีแดนซ์ของเสาแต่ละช่วง (Ω)
	h_k	คือ ความสูงของเสาคอนกรีตแต่ละช่วงถึงพื้นดิน (m)
	r_{ek}	คือ รัศมีของเสาแต่ละช่วง (m)

$$r_{ek} = r_T^{1/3} r_B^{2/3}$$

เมื่อ	r_T	คือ รัศมียอดเสา (m)
	r_B	คือ รัศมีฐานเสา (m)



รูปที่ 3.5 แบบจำลองเสาที่ใช้ในการศึกษา

3.3.4 แบบจำลองฉนวนลูกถ้วย

ในการศึกษาการแพร่กระจายของคลื่น ค่าความจุไฟฟ้าของอุปกรณ์ในระบบมีผลต่อรูปร่างของคลื่น โดยเฉพาะคลื่นที่มีเวลาหน้าคลื่นที่เร็วมาก [15] ซึ่งการเพิ่มสมรรถนะในการป้องกันระบบต่อแรงดันเกินฟ้าผ่าอย่างหนึ่งคือ การใช้จำนวนลูกถ้วยที่เหมาะสมจะทำให้อัตราการเกิดความเสียหายลดลงได้สำหรับระบบ 115 kV ตามมาตรฐาน IEEE 1243-1997 [16] ได้นำเสนอให้ใช้

ลูกถ้วยแขวนมาตรฐาน 146 มม. แบบ 52-3 และ 52-8 จำนวน 7-9 ลูกถ้วย แต่ละลูกถ้วยมีค่าพิทักแรงดันวบไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤตทางบวก เท่ากับ 125 kV แสดงในตารางที่ 3.1

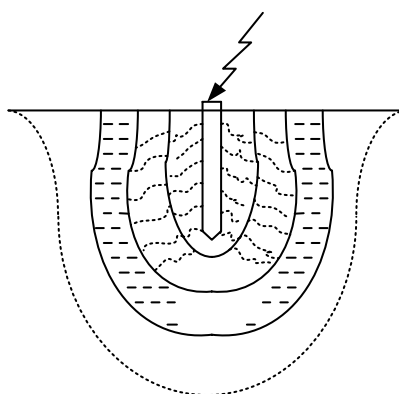
ตารางที่ 3.1 ระดับแรงดันสูงสุดที่พวงลู่ถ้วยรับได้

จำนวน ลู่ถ้วย	แรงดันที่ รับได้ (เปอรูยู นิต)	แรงดันที่ รับได้ (กิโลโวลต์)	จำนวน ลู่ถ้วย	แรงดันที่ รับได้ (เปอรูยู นิต)	แรงดันที่ รับได้ (กิโล โวลต์)
1	1	125	6	4.856	606.99
2	1.7967	224.58	7	5.6182	702.27
3	2.5657	320.71	8	6.3802	797.53
4	3.3303	416.28	9	7.1421	892.77
5	4.0934	511.68	10	7.904	988.00

3.3.5 แบบจำลองความต้านทานดินที่ฐานเสาไฟฟ้า [17]

ความต้านทานดินของฐานเสาในสภาวะคงตัวขึ้นอยู่กับรูปแบบของตัวนำที่ต่อลงดิน และคุณสมบัติของดินโดยรอบ แต่ในกรณีของกระแสฟ้าผ่านั้น ค่าอิมพีแดนซ์มีการเปลี่ยนแปลงก่อนจะเข้าสู่ค่าที่สภาวะคงตัว นอกจากนี้ถ้ากระแสมีค่ามากพอที่จะทำให้เกิดการเบรกดาวนภายในดิน ลักษณะการไหลของกระแสในดินจะเปลี่ยนแปลงไป ทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ที่สภาวะคงตัวเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย แบบจำลองที่สร้างขึ้นจึงเป็นแบบจำลองชนิดขึ้นกับความถี่และขึ้นกับค่ากระแสหรือแบบจำลองชนิดไม่เชิงเส้น

3.3.5.1 ความต้านทานดินในกรณีกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่า [9] กรณีเกิดฟ้าผ่าลงเสาไฟฟ้าโดยตรง กระแสฟ้าผ่าส่วนหนึ่งจะไหลผ่านรากสายดินลงดิน ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นรอบๆ รากสายดินโดยแปรเปลี่ยนตามเวลา เมื่อความเข้มสนามไฟฟ้ามีค่าสูงกว่าสนามไฟฟ้าวิกฤตของดิน จะทำให้ดินรอบตัวนำเกิดการเบรกดาวน ซึ่งจะเปรียบเสมือนรากสายดินมีขนาดใหญ่ขึ้นเป็นผลให้ความต้านทานดินในบริเวณนั้นมีค่าเปลี่ยนแปลงไป ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 อิมพัลส์เบรกดาวนของดินรอบๆ รากสายดิน

เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลลงสู่ระบบสายรากดินจะแพร่กระจายไหลในดิน แรงดันที่รากสายดินจะเปลี่ยนแปลงตามเวลา ทำให้มีการนำกระแสเพิ่มขึ้น ดังนั้นความจุไฟฟ้าของดิน หาได้จากสมการ 3.3 [17,18]

$$C = \frac{\epsilon_r l}{18 \ln\left(\frac{4l}{d}\right)} \times 10^{-9} \quad (3.3)$$

เมื่อ ϵ_r คือ relative permittivity ของดิน ($\epsilon_r = 10$)

กระแสที่ไหลลงดินโดยผ่านรากสายดิน จะมีผลทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นรอบๆ ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำที่รากสายดิน หาได้จากสมการ 3.4

$$L = 2l \ln\left(\frac{4l}{d}\right) \times 10^{-7} \quad (3.4)$$

ค่าความต้านทานอิมพีแดนซ์ของดิน จะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น รูปทรงทางเรขาคณิตของรากสายดิน (ขนาดและความลึก) สภาพความต้านทานของดิน รูปคลื่นและขนาดของกระแสอิมพีแดนซ์ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความถี่กำลัง หาได้จากสมการ 3.5

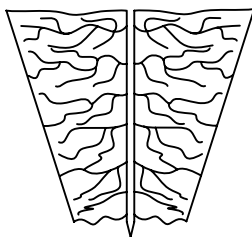
$$R_i = \alpha R_o \quad (3.5)$$

เมื่อ α คือ สัมประสิทธิ์อิมพีแดนซ์
 R_i คือ ความต้านทานอิมพีแดนซ์ของดิน

มาตรฐานของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคใช้ตัวนำลงดินเป็นชนิดแท่ง ความต้านทานดินที่ฐานเสา หาได้จากสมการ 3.6

$$R_o = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{8l}{d} - 1 \right) \quad (3.6)$$

เมื่อกระแสอิมพีแดนซ์ไหลผ่านรากสายดิน ดินจะเกิดการเบรกดาวน์อย่างไม่สม่ำเสมอ กล่าวคือจะเกิดการเบรกดาวน์บริเวณใกล้จุดรับกระแสด้านบนมากกว่าบริเวณที่ลึกลงไปในดิน สาเหตุก็เนื่องจากผลของความเหนี่ยวนำขัดขวางการไหลของกระแสไฟฟ้าลงดิน ดังแสดงในรูปที่ 3.7 [19]



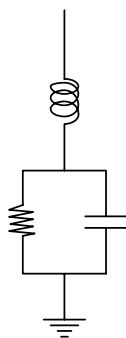
รูปที่ 3.7 การเกิดดินร้าวบริเวณรอบๆ รากสายดิน

ดังนั้นสัมประสิทธิ์อิมพัลส์จะมีความสัมพันธ์กับกระแสไฟฟ้า รูปทรงทางเรขาคณิตของรากสายดิน และสภาพความต้านทานของดิน หาได้จากสมการ 3.7

$$\alpha = 2.75 \rho^{-0.4} (1.8 + \sqrt{I}) [0.75 - \exp(-1.5 I_m^{-0.2})] \quad (3.7)$$

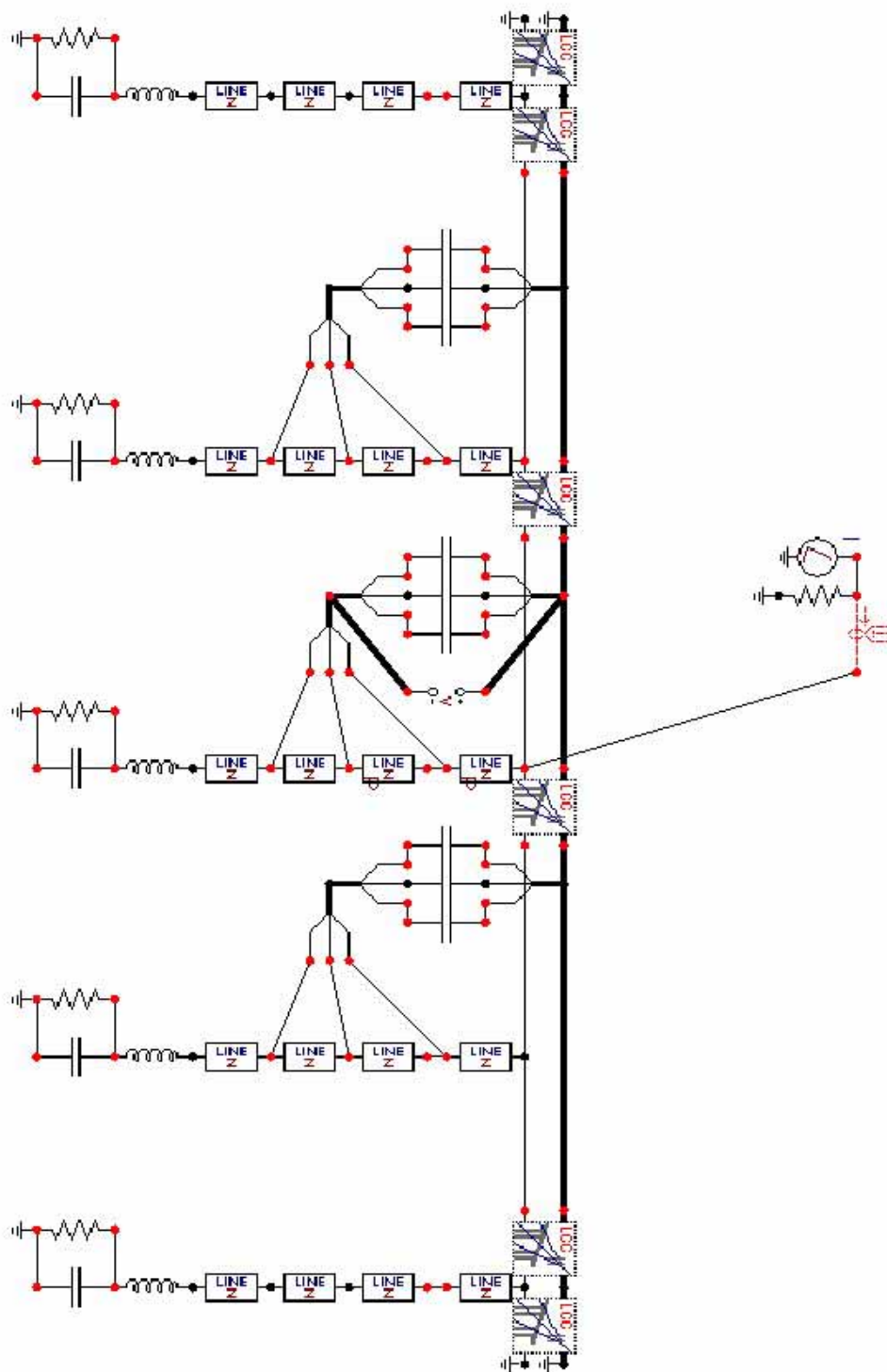
เมื่อ ρ คือ สภาพความต้านทานดินจำเพาะ ($\Omega - m$)
 I_m คือ กระแสไฟฟ้า (kA)
 l คือ ความยาวรากสายดิน (m)

โดยทั่วไปค่าความต้านทานดินที่ฐานเสา ได้จากการวัดในภาคสนามหรือได้จากการคำนวณโดยใช้สูตรตามมาตรฐานนั้น ขึ้นอยู่กับรูปทรงของแท่งตัวนำลงดิน ค่าเหล่านี้เป็นค่าความต้านทานที่ความถี่กำลัง แต่ในความเป็นจริงค่าความต้านทานดินที่ฐานเสาลดลงเมื่อมีกระแสไฟฟ้า ความถี่สูงไหลผ่านและจากคุณสมบัติของดินโดยรอบ แต่ในกรณีไฟฟ้า ค่ากระแสไฟฟ้า ค่าอิมพีแดนซ์มีการเปลี่ยนแปลงก่อนจะเข้าสู่ค่าที่สภาวะคงตัว นอกจากนี้ถ้ากระแสมีค่ามากพอที่จะทำให้เกิดเบรกดาวน์ภายในดิน ลักษณะการไหลของกระแสในดินจะเปลี่ยนแปลงไป ทำให้ค่าอิมพีแดนซ์มีการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ดังนั้นแบบจำลองความต้านทานดินที่ฐานเสา ที่สร้างขึ้นจึงเป็นแบบจำลองชนิดขึ้นกับความถี่และกระแส ดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 แบบจำลองวงจรสมมูลของตัวนำลงดินชนิดขึ้นกับความถี่และกระแส

จากข้อมูลทฤษฎีข้างต้นสามารถนำมาทำการจำลองค่าพารามิเตอร์ ของวงจรส่วนต่างๆ ที่ใช้ในการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม ATP – EMTP ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 บล็อกไดอะแกรมของแบบจำลอง