

Simplified Method of Lightning Performance Assessment of OHL with Line Lightning Protection Devices

Mr D. Belko¹, Mr M. Zinck², Mr C. Chuayin³, Mr S. Turatham³

¹ Streamer Electric Company, St. Petersburg, Russia (dmitry.belko@streamer.ru)

² Streamer Electric AG, Bangkok, Thailand (matthieu.zinck@streamer-electric.com)

³ King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand
(chaitwat09@gmail.com, sakkarin@paralec.com)

บทคัดย่อ

บทความนี้มุ่งเสนอวิธีอย่างง่ายสำหรับการคำนวณประสิทธิภาพในการป้องกันผลกระทบจากฟ้าผ่าของสายส่ง และเปรียบเทียบกับวิธี Monte Carlo ซึ่งเป็นวิธีดั้งเดิมตามมาตรฐาน IEEE 1410 โดยใช้ซอฟต์แวร์ ATP-EMTP คำอธิบายหลักของวิธีอย่างง่ายในการคำนวณความน่าจะเป็นของการเกิดวาบไฟตามผิวและนำมาซึ่งการพัฒนาซอฟต์แวร์ Groza ในขั้นต้นได้อธิบายไว้ในบทความนี้ จากวิธีการคำนวณที่เสนอนั้นแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพฟ้าผ่าของสายส่ง และการปรับปรุงประสิทธิภาพให้เพิ่มขึ้นของการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันสายส่งจากฟ้าผ่า (Line Lightning Protection Devices: LLPD) บนเสาส่งอย่างเหมาะสม บทความนี้ได้พิจารณาถึงฟ้าผ่าโดยตรงที่เกิดขึ้นกับสายกราวด์เหนือศีรษะ (Over Head Ground Wire: OHGW) ที่ตำแหน่งครึ่งหนึ่งของระยะห่างระหว่างเสาส่ง (Span)

คำสำคัญ: สายส่งเหนือศีรษะ, การป้องกันฟ้าผ่า, ประสิทธิภาพฟ้าผ่า, ไฟฟ้าดับ, back flash over, ฟ้าผ่าโดยตรง, LLPD

1. บทนำ

ในปัจจุบันนี้มีวิธีการคำนวณประสิทธิภาพในการป้องกันผลกระทบจากฟ้าผ่าอยู่หลากหลายวิธีโดยการใช้ซอฟต์แวร์ EMTP (ATP, EMTP-RV) [1, 2] การจำลองแบบ 2

มิติและ 3 มิติโดยใช้โปรแกรม FEM วิธีของ Monte Carlo [3] การออกแบบสายส่ง และอื่น ๆ โดยวิธีเหล่านี้มีความละเอียดเป็นอย่างมากและอาศัยความเชี่ยวชาญเฉพาะทางของผู้ใช้โปรแกรม ด้วยเหตุนี้การคำนวณควรที่จะสามารถแสดงจำนวนไฟฟ้าดับที่เกิดขึ้นจากฟ้าผ่าของแต่ละวงจรในแต่ละปีได้ในทางปฏิบัติการคำนวณเพื่อให้ได้คำตอบที่แม่นยำดังกล่าวนั้นไม่มีความจำเป็นสำหรับหน่วยงานหรือบริษัทที่ทำหน้าที่ควบคุมสายส่ง ยิ่งกว่านั้นจำนวนไฟฟ้าดับส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นนั้นขึ้นอยู่กับฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นในแต่ละภูมิภาคที่อาจเปลี่ยนแปลงในแต่ละปี หน่วยงานหรือบริษัทที่ทำหน้าที่ควบคุมสายส่งควรทราบวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพฟ้าผ่าของสายส่งด้วยประสิทธิภาพสูงสุดและค่าใช้จ่ายน้อยโดยไม่ต้องใช้การคำนวณองค์ประกอบของวงจรสายขนาดใหญ่และแบบจำลองที่ซับซ้อน วิธีการดังกล่าวได้ถูกนำมาใช้ในซอฟต์แวร์ GrozaTM โดยใช้อุปกรณ์ป้องกันสายส่งจากฟ้าผ่าจากบริษัท Streamer Electric บทความนี้มุ่งเน้นที่การเปรียบเทียบระหว่างผลลัพธ์ของความน่าจะเป็นของการเกิดวาบไฟย้อนกลับ (Back Flashover: BFO) ที่ได้จากรูปแบบการคำนวณอย่างง่ายและจากการจำลองในซอฟต์แวร์ EMTP ในโหมด ATP โดยใช้วิธี Monte Carlo

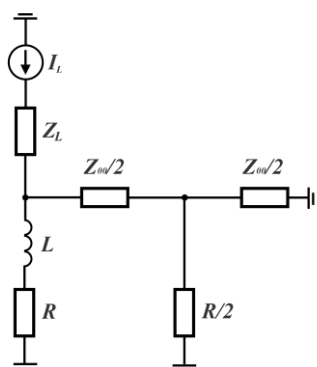
2. รูปแบบวิธีอย่างง่ายในการคำนวณความน่าจะเป็นของการเกิดวาบไฟย้อนกลับ

รูปแบบเดิมในการคำนวณกระแสผิดพ่วงในสายส่งนั้นได้อธิบายใน [4] บทความนี้อธิบายเพียงวิธีการคำนวณ

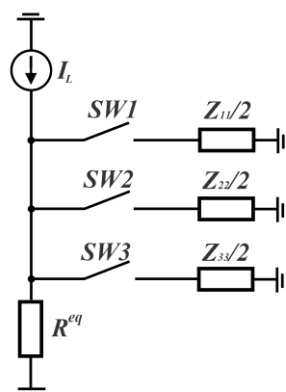
ความน่าจะเป็นของการเกิดวาทไฟย้อนกลับเนื่องจากฟ้าผ่าในสายกราวด์เหนือศีรษะ(OHGW) ความน่าจะเป็นของวาทไฟตามผิวที่เกิดจากฟ้าผ่าบนสายส่งอาจถูกกำหนดโดยกระแสฟ้าผ่าวิกฤตโดยใช้สูตรการกระจายของกระแสฟ้าผ่าจาก IEEE Guide [5].

$$P = \frac{1}{1 + \left(\frac{I^{crit}}{31} \right)^{2.6}} \quad (1)$$

เมื่อพิจารณากรณีของฟ้าผ่าบนเสาส่งที่มีสายดิน โดยสนใจค่ากระแส I_p ซึ่งไหลผ่านเสาส่งนี้ ค่ากระแสนี้จะลดลงตามการแตกกิ่งตามสายกราวด์ไปยังเสาส่งใกล้เคียง เมื่อระยะห่างระหว่างเสาส่งสั้นลง กระแสที่ไหลจะมากขึ้นตาม [6] กระแสที่ไหลผ่านเสาส่งสามารถแสดงในรูปของคาร์ดิคชันแพกเตอร์ (ตัวคูณลด) $I_p = \eta I_L$ ในหาค่าตัวคูณลดจะใช้วงจรสมมูลในรูปที่ 1 ในการคำนวณ



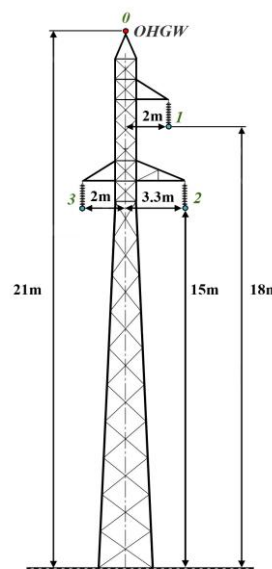
รูปที่ 1 วงจรสมมูลสำหรับการคำนวณตัวคูณลดของกระแสฟ้าผ่า



รูปที่ 2 วงจรสมมูลสำหรับการคำนวณลำดับของวาทไฟย้อนกลับ

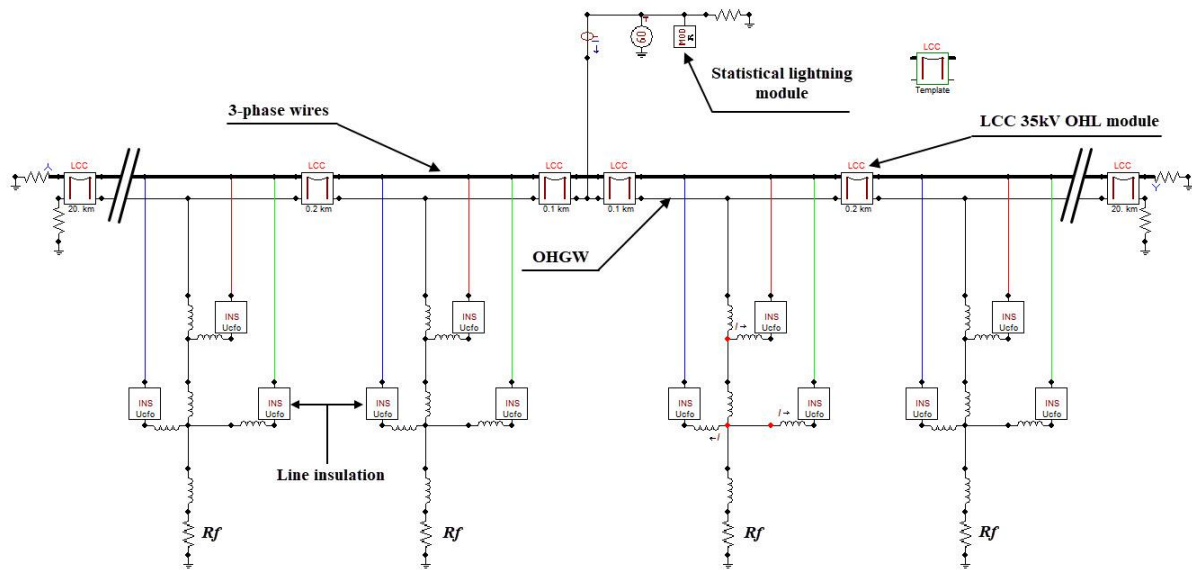
ขั้นตอนต่อไปประกอบด้วยกำหนดลำดับของวาทไฟตามผิวของเฟสทั้งหมดบนสายส่ง และหาค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤตสำหรับวาทไฟเหล่านี้ เพื่อความเรียบง่ายให้พิจารณา

กรณีของสายส่งวงจรเดียวสามเฟส โดยแบบจำลองการวิเคราะห์วงจรสมมูลจะแสดงในรูปที่ 2 ความต้านทานของเสาส่งสมมูล R_{eq} จะพิจารณาตามกระแสฟ้าผ่าที่ไหลตามสายกราวด์ไปยังเสาส่งใกล้เคียงตามที่ระบุไว้ข้างต้น เสร็จจิมพีแดนซ์ฟ้าผ่า $Z_L=300 \Omega$ รวมทั้งแรงดันตกที่ส่งผลกระทบต่อความนำของเสาส่งซึ่งแปรผกผันกับเวลาหน่วงคลื่นของฟ้าผ่า ศักย์ไฟฟ้าที่สายกราวด์ควรถูกเหนี่ยวนำไปยังตัวนำแต่ละเส้นโดยศักย์ไฟฟ้านี้สามารถหาได้โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์สัมพัทธ์ k ทำการหาค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤต i สำหรับการเกิดวาทไฟย้อนกลับสำหรับตัวนำแต่ละเส้น และ V_{CFO} ของลูกถ้วยหรืออุปกรณ์ป้องกันอื่น ๆ ใช้เป็นแรงดันเบรกดาวน์ สมมติว่าเฟสแรกที่เกิดวาทไฟตามผิวคือ $i=3$ พร้อมมีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันไว้ โดยมีเงื่อนไขว่า LLPD นั้นทำงานได้อย่างถูกต้องอาร์กจะต้องถูกดับและทำให้ไม่เกิดไฟฟ้าดับในวงจรสายส่ง



รูปที่ 3 เสาของสายส่งเหนือศีรษะ 35 kV ที่ทำการคำนวณเปรียบเทียบ

อย่างไรก็ตาม หากไม่มีการป้องกันในเฟสอื่น ควรพิจารณากระแสฟ้าผ่าวิกฤตสำหรับการวาทไฟตามผิวครั้งที่สองของเฟส 1 หรือ 2 เพื่อประเมินจำนวนการเกิดไฟดับที่น่าจะเป็นไปได้ ในวงจรสมมูล รูปที่ 2 ไฟวาทตามผิวครั้งแรกจะสัมพันธ์กับการปิดสวิตช์ SW3 กระแสจะไหลตามตัวนำของเฟส 3 และความต้านทานเสาส่งสมมูล R_{eq} จะมีค่าลดลง ค่าสัมประสิทธิ์สัมพัทธ์ของสายส่งและเฟสที่เกิดวาทไฟตามผิวรวมถึงเฟสอื่น ๆ มีการเปลี่ยนแปลงเช่นกันโดยลำดับของการ



รูปที่ 4 แบบจำลองวงจรในซอฟต์แวร์ ATP-EMTP สำหรับการคำนวณโดยวิธี Monte Carlo

เกิดไฟวบบย้อนกลับนั้นคำนวณอย่างเป็นขั้นตอน โดยทั่วไปจะคำนวณด้วยสมการที่ 2 ถึง 5

$$R_i^{eqNf} = \frac{\eta}{\frac{1}{Z_L} + \frac{1}{R_i^y} + \frac{2}{Z_{00}} + \frac{2}{Z_{f1,f1}} + \dots + \frac{2}{Z_{Nf-1,Nf-1}}} \quad (2)$$

$$k_i^{Nf} = \frac{Z_{0i} + Z_{f1,i} + Z_{f2,i} + \dots + Z_{Nf-1,i}}{Z_{00} + Z_{0,f1} + Z_{0,f2} + \dots + Z_{0,Nf-1}} \quad (3)$$

$$I_i^{Nf} = \frac{V_{CFO i}}{R_i^{eqNf} (1 - k_i^{Nf})}, \quad I_i^{Nf} = \min(|I_i^{Nf}|) \quad (4)$$

$$P^{Nf} = \frac{1}{1 + \left(\frac{I_i^{Nf}}{31} \right)^{2.6}} \quad (5)$$

เมื่อ

i คือ ดัชนีของสายส่ง, $i > 0$ คือตัวนำแต่ละเฟส, $i = 0$ คือสายกราวด์เหนือศีรษะ

N_f คือ จำนวนครั้งของการเกิดวบบไฟตามผิวจาก 1 ถึง i

$f_1, f_2 \dots$ คือ จำนวนไฟวบบตามผิวที่เกิดบนตัวนำลำดับต่างๆ

R_i^{eqNf} คือ ความต้านทานเสาส่งสมมูลของตัวนำ i ที่มีการเกิดไฟวบบตามผิวครั้งที่ N_f .

R_i^y คือ ความต้านทานเสาส่งสมมูลที่มีค่าความเหนี่ยวนำของตัวนำ i

k_i^{Nf} คือ ค่าสัมประสิทธิ์สัมพัทธ์ของตัวนำ i มีการเกิดไฟวบบตามผิวครั้งที่ N_f .

I_i^{Nf} คือ กระแสฟ้าผ่าวิกฤติของเฟสที่เกิดวบบไฟตามผิว i ที่มีการเกิดไฟวบบตามผิวครั้งที่ N_f .

$V_{CFO i}$ คือ แรงดันฟ้าผ่าวิกฤติของฉนวนลูกถ้วยหรืออุปกรณ์ป้องกันของเฟส i

Z_{ii} คือ เสรีจิมพีแดนซ์ของตัวเอง i

Z_{ij} คือ เสรีจิมพีแดนซ์ร่วมระหว่างตัวนำ i กับตัวนำ j .

2.1 การคำนวณความน่าจะเป็นในการเกิดวบบไฟย้อนกลับโดยวิธี Monte Carlo ในซอฟต์แวร์ ATP-EMTP

จากเครื่องมือคำนวณสำหรับวิเคราะห์การจ่ายของกระแส ได้มีการใช้การคำนวณผ่านซอฟต์แวร์ ATP-EMTP (Electromagnetic Transients Program) ข้อดีของ ATP-EMTP คือความแม่นยำ ความเป็นมิตรและมีประสิทธิภาพต่อผู้ใช้งาน โดยสามารถสร้างแบบจำลองในการคำนวณที่เป็นไปได้บนพื้นฐานของการเขียนโปรแกรมให้กับส่วนประกอบวงจรและแบบจำลองต่าง ๆ รวมถึงพิจารณาแรงดันบนฉนวนที่เกิดจากวบบไฟย้อนกลับที่จำเป็นสำหรับการวิเคราะห์แรงดันเกินเนื่องจากฟ้าผ่าและการวิเคราะห์พารามิเตอร์ทางสถิติของอิมพัลส์ฟ้าผ่า แบบจำลองประกอบด้วย

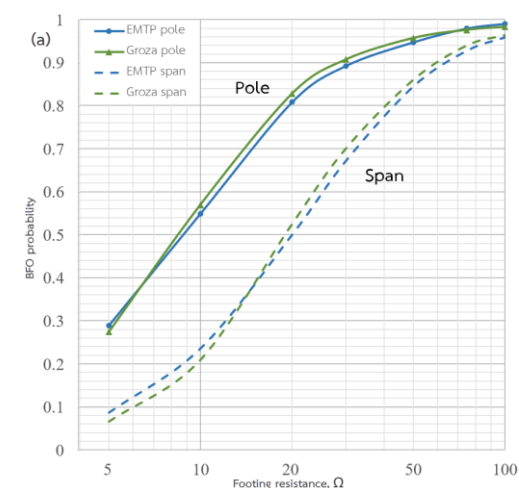
- 1) แบบจำลอง LCC ที่ประกอบด้วยพารามิเตอร์สายส่ง
- 2) เสาส่งจะแสดงด้วยค่าความเหนี่ยวนำและความต้านทานเสาส่ง โดยประเภทของเสาส่งจะแสดงดังรูปที่ 3
- 3) แหล่งกำเนิดฟ้าผ่าประเภท CIGRE โดยภายในแบบจำลองได้ถูกปรับตั้งพารามิเตอร์ทางสถิติเอาไว้ ค่ากระแสฟ้าผ่ามัธยฐาน 31 kA ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.28 เพื่อให้ตรงกับสมการที่ (1)

4) ลูกถ้วยสายส่งกับเงื่อนไขของการเกิดวาบไฟตามผิวที่ถูกโปรแกรมเอาไว้

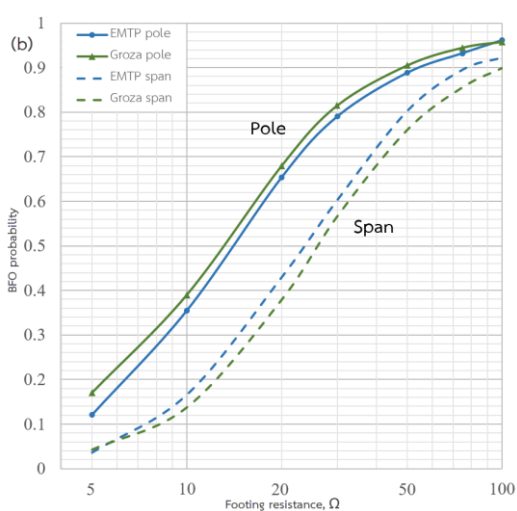
โดยส่วนของวงจรที่ทำการวิเคราะห์ในซอฟต์แวร์ EMTP จะแสดงดังรูปที่ 4

2.2 ผลการทดลองและการเปรียบเทียบ

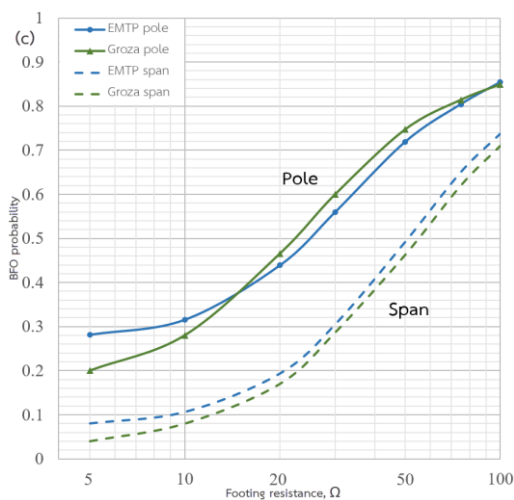
การศึกษาได้พิจารณาสายส่งเหนือศีรษะ 35 kV และสายกราวด์เหนือศีรษะบนเสาสูงดังรูปที่ 3 โดยระยะห่างระหว่างเสาสูงเป็น 200 เมตร แรงดันวาบไฟตามผิววิกฤติของฉนวน $V_{\text{CFO}} = 240$ kV การคำนวณความน่าจะเป็นของการเกิดวาบไฟย้อนกลับ ของฉนวนเชิงเส้นสำหรับสายส่งแต่ละเฟส ในช่วงความต้านทานเสาสูงตั้งแต่ 5 ถึง 100 Ω



(a)

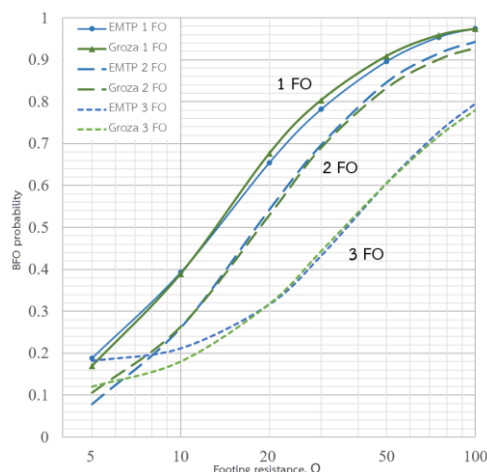


(b)



(c)

รูปที่ 5 ความน่าจะเป็นของการเกิดวาบไฟย้อนกลับจากฟ้าผ่าโดยตรงบนเสาสูงและฟ้าผ่าบนระยะระหว่างสายกราวด์เหนือศีรษะ ที่คำนวณโดยใช้วิธี Monte Carlo ด้วยซอฟต์แวร์ ATP-EMTP และคำนวณโดยวิธีอย่างง่ายด้วยซอฟต์แวร์ Groza โดยที่ a) วาบไฟตามผิวในเฟสที่ 1 b) วาบไฟตามผิวในเฟสที่ 2 และ c) วาบไฟตามผิวในเฟสที่ 3



รูปที่ 6 การเปรียบเทียบความน่าจะเป็นของการเกิดวาบไฟย้อนกลับทั้งหมดที่คำนวณผ่านซอฟต์แวร์ ATP-EMTP และ Groza ของทุกเฟสที่เกิดวาบไฟตามผิว

รูปที่ 5 (a) (b) และ (c) แสดงการเปลี่ยนแปลงตามความน่าจะเป็นของการเกิดวาบไฟย้อนกลับของสายส่งแต่ละเฟสในกรณีที่เกิดฟ้าผ่าที่เสาและในระยะจุดกึ่งกลางของสายกราวด์เหนือศีรษะ บนความต้านทานเสาสูง คำนวณโดยสองวิธี ได้แก่

1) วิธีการคำนวณโดยรูปแบบอย่างง่ายซึ่งอธิบายไว้ในหัวข้อที่ 2 (ดังรูปกราฟที่มีชื่อว่า Groza)

2) วิธีการคำนวณโดยวิธี Monte Carlo ในซอฟต์แวร์ ATP-EMTP ซึ่งอธิบายไว้ในหัวข้อที่ 2.1 (ดังรูปกราฟที่มีชื่อว่า EMTP)

จากการตีความกราฟสามารถระบุได้ว่าความสัมพันธ์ที่มีแนวโน้มที่ดีที่สุดของความน่าจะเป็นของการเกิดวาบไฟย้อนกลับนั้นสังเกตได้จากวาบไฟตามผิวครั้งแรกสำหรับทั้งสองกรณีที่เกิดฟ้าผ่าบนเสาส่งและในระยาระหว่างสายส่ง ส่วนการวาบไฟตามผิวลำดับถัดมาจะให้ผลลัพธ์ที่มีความคลาดเคลื่อนมากขึ้น ในกรณีที่ฟ้าผ่าโดยตรงบนเสาส่ง ผลลัพธ์การคำนวณจากซอฟต์แวร์ Groza จะถูกประมาณได้ค่าสูงเกินไปเล็กน้อยในทางกลับกัน กรณีที่ฟ้าผ่าบนระยาระหว่างเสาส่ง ผลลัพธ์ที่คำนวณจากซอฟต์แวร์จะถูกประมาณได้ค่าต่ำเกินไป เห็นได้ชัดว่าค่าความน่าจะเป็นของการเกิดวาบไฟย้อนกลับ ในกรณีฟ้าผ่าบนเสาส่งจะสูงกว่าในกรณีฟ้าผ่าบนระยาระหว่างเสาส่ง เนื่องจากการแบ่งกระแสฟ้าผ่าในสองทิศทางในกรณีฟ้าผ่าบนระยาระหว่างเสาส่ง สิ่งนี้ทำให้สังเกตเห็นได้ชัดเจนยิ่งขึ้นที่ความต้านทานการต่อลงดินของเสาส่งมีค่าต่ำ ที่ความต้านทานสูงนั้นค่าต่าง ๆ จะอยู่ในแนวโน้มเดียวกัน

ควรสังเกตว่าที่ค่าต่ำของความต้านทานเสาส่งที่ต่ำกว่า 10Ω ความคลาดเคลื่อนในอัตราส่วนเป็นเปอร์เซ็นต์จะมากกว่าที่ค่าความต้านทานเสาส่งสูง ซึ่งเป็นเพราะอิทธิพลของการค่าความเหนี่ยวนำของเสาส่ง อย่างไรก็ตาม ในขั้นตอนสุดท้ายของการคำนวณความต้านทานฟ้านั้นจำเป็นต้องใช้ค่าเฉลี่ยของความน่าจะเป็นของการเกิดวาบไฟย้อนกลับระหว่างกรณีที่ฟ้าผ่าบนเสาส่งโดยตรงและฟ้าผ่าบนระยาระหว่างเสาส่งจากสมการ

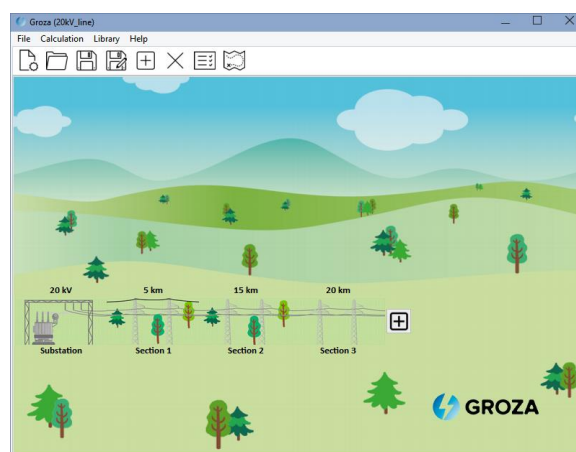
$$P_{BFO}^{total} = \frac{P_{BFO}^{span} + P_{BFO}^{pole}}{2} \quad (6)$$

จากกราฟที่มีความน่าจะเป็นของการเกิดวาบไฟย้อนกลับทั้งหมดนั้น สำหรับการวาบไฟตามผิวทั้งสามเฟสแสดงในรูปที่ 6 ซึ่งมีความสอดคล้องกันของค่าผลลัพธ์การคำนวณที่ได้รับจากซอฟต์แวร์ EMTP และในซอฟต์แวร์ Groza มากขึ้น

3. วิเคราะห์ผลการคำนวณแบบจำลอง

วิธีการคำนวณโดยง่ายที่ได้อธิบายไว้ข้างต้น ได้ถูกนำมาใช้งานในซอฟต์แวร์ Groza (ดังรูปที่ 7) สำหรับการคำนวณประสิทธิภาพฟ้าผ่าของสายส่งด้วยซอฟต์แวร์ Groza โดยซอฟต์แวร์สามารถจำลองสายส่งแบบวงจรเดียวหรือสองวงจรได้ในระดับแรงดันสูงถึง 115 kV และแบ่งการจำลองออกเป็นส่วน ๆ เพื่อกำหนดระดับการป้องกันฟ้าผ่าของแต่ละส่วนของสายส่งโดยมีหรือไม่มีติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันสายส่งจากฟ้าผ่า

การจัดเรียงทางเรขาคณิตของตัวนำและสายไฟบนเสาส่งทั้งหมด ลักษณะรูปทรงและประเภทของเสาส่ง ฉนวนสายและรูปแบบการเกิดฟ้าผ่าในพื้นที่นั้นถูกกำหนดให้เป็นพารามิเตอร์อินพุตสำหรับการคำนวณของซอฟต์แวร์ ผลลัพธ์จากการคำนวณจะบ่งบอกถึงจำนวนครั้งของการเกิดไฟฟ้าดับเป็นรายปีจากฟ้าผ่าโดยตรงและจากแรงดันเกินเนื่องจากการเหนี่ยวนำ เพื่อนำข้อมูลเหล่านี้ไปใช้สำหรับการประเมินประสิทธิภาพฟ้าผ่าของสายส่ง และเพิ่มระดับการป้องกันฟ้าผ่าของสายส่ง



รูปที่ 7 หน้าจอแสดงผลของซอฟต์แวร์ Groza

4. สรุป

การคำนวณประสิทธิภาพฟ้าผ่าของสายส่งด้วยวิธีอย่างง่ายได้ถูกนำเสนอในบทความ โดยวิธีนี้ใช้รูปแบบการวิเคราะห์ด้วยค่าขั้นต่ำของอินพุตพารามิเตอร์ของสายส่ง และจำเป็นต้องกำหนดขอบเขตของการประมาณประสิทธิภาพฟ้าผ่า วิธีการนี้ช่วยในการกำหนดจำนวนครั้งที่เกิดไฟฟ้าดับในแต่ละปีจากฟ้าผ่าโดยตรงที่เสาส่งหรือฟ้าผ่าที่จุดกึ่งกลางระยาระหว่างเสาส่ง แนวทางนี้อาจใช้ในการประเมินการเพิ่มระดับการป้องกันฟ้าผ่าในสายส่งด้วยการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันและเพื่อหารูปแบบการจัดวางอุปกรณ์บนเสาส่งที่เหมาะสม การเปรียบเทียบการคำนวณความน่าจะเป็นของการเกิดวาบไฟย้อนกลับของสายส่งทั้งสามเฟสโดยวิธี Monte Carlo ในซอฟต์แวร์ ATP-EMTP ตามรูปแบบวงจรสมมูลของสายส่งเหนือศีรษะ 35 kV แสดงให้เห็นการเปรียบเทียบที่เหมาะสมของค่าความน่าจะเป็นอย่างครอบคลุมมากที่สุดสำหรับการประเมินประสิทธิภาพฟ้าผ่าของสายส่งเหนือศีรษะ โดยวิธีการนี้ถูกนำมาใช้ในซอฟต์แวร์ Groza ซึ่งสามารถเป็นซอฟต์แวร์

แนะนำสำหรับวิศวกรออกแบบสายส่งและสำหรับบริษัทที่ดูแล
ควบคุมสายส่งอยู่

เอกสารอ้างอิง

- [1] P. Malicki, A. Mackow, M. Kizilcay, “Estimating the lightning performance of a multi-circuit transmission tower”, 33rd ICLP, 2016.
- [2] L. Zejun, G. Shanqiang, Z. Chun, “Calculation of lightning trip-out rates for 10kV overhead distribution line”, 32nd ICLP, 2014.
- [3] N. Filipe, C. Cardoso, J. Mendes, A. Leiria, D. Duarte, L. Perro, M. M. Fernandes, “A methodology for estimating transmission lines lightning performance using a statistical approach”, 33rd ICLP, 2016
- [4] D. Belko, M. Zhitenev, “Implementation of the Analytical Method for the Lightning Performance Assessment of Power Line with Line Lightning Protection Devices”, 15th SIPDA, 2019
- [5] IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines, IEEE Std. 1410-2010.
- [6] D.O. Belko, G.V. Podporkin, “Analysis of current distribution among long-flashover arresters for 10 kV overhead line protection against direct lightning strikes”, 33rd ICLP, 2016.