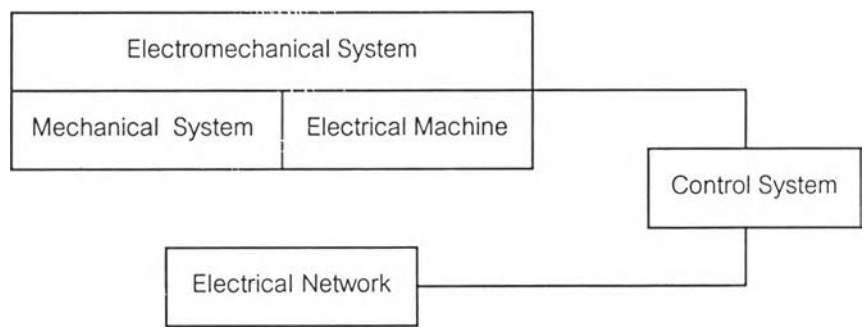
บทที่ 3

โปรแกรม EMTP และ แบบจำลองเบรกดาวน์

3.1 โปรแกรม EMTP

Electro-Magnetic Transients Program หรือที่เรียกโดยย่อว่า EMTP เป็นโปรแกรมที่ได้รับการพัฒนาขึ้นมาเพื่อช่วยในการคำนวณระบบไฟฟ้าในสภาวะทรานเซียนต์แม่เหล็กไฟฟ้าที่มีช่วงเวลาเป็น ไมโครวินาที ถึงวินาที โดยเน้นไปที่ระบบไฟฟ้ากำลัง EMTP จะทำการวิเคราะห์ในโดเมนเวลาโดยอาศัยการแปลงเทอมที่ขึ้นกับความถี่ให้เป็นเทอมในโดเมนเวลาก่อนด้วยหลักการของ Time Convolution

โปรแกรม EMTP ประกอบไปด้วย ตัวต้านทาน R ตัวเหนี่ยวนำ L ตัวเก็บประจุ C และองค์ประกอบต่างๆสำหรับจำลองระบบไฟฟ้า รวมทั้งวงจรไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ทั่วไป นอกจากนี้ยังมีองค์ประกอบสำหรับการวิเคราะห์ระบบควบคุม ได้แก่ TACS(Transient Analysis of Control System) และ ภาษาMODELS ซึ่งสามารถนำไปวิเคราะห์ระบบเครื่องกลไฟฟ้าได้ เช่น มอเตอร์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า องค์ประกอบจำลองใน EMTP สามารถแสดงได้ดังรูปที่



รูปที่ 3.1 องค์ประกอบจำลองใน EMTP

1) ระบบเครื่องกลไฟฟ้า (Electromechanical System) ประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นเครื่องกลทั้งหมด เช่น กังหัน และส่วนที่เป็นแม่เหล็กไฟฟ้า(Electromagnetic) เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือมอเตอร์ ตัวแปรที่ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ ได้แก่ ความเร็วของแกนหมุน(Rotor Speed) และแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า(Electromagnetic Torque) ส่วนที่เป็นเครื่องกลสามารถสร้างองค์ประกอบจำลองสมมูลขึ้นด้วยวงจรไฟฟ้าที่มีแต่พารามิเตอร์ชนิดก้อน(Lumped Parameter) เช่น แรงบิดจะมีลักษณะคล้ายกับกระแสและความเร็วโรเตอร์คล้ายกับแรงดัน ส่วน

ที่เป็นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดเครื่องกลจักรไฟฟ้ากระแสตรง หรือกระแสสลับ สามารถใช้องค์ประกอบจำลองเดียวกันกับหลักการทฤษฎี Generalized Machine ซึ่งเรียกว่า Universal Machine Model

2) ระบบวงจรไฟฟ้า (Electrical Network System) เป็นส่วนที่มีองค์ประกอบสำคัญอยู่เป็นจำนวนมากที่อาจสร้างองค์ประกอบจำลองจากแบบโดยประมาณ ไปจนถึงแบบที่ละเอียดถูกต้อง เช่น แหล่งจ่ายพลังงานขนาดใหญ่ซึ่งมีอุปกรณ์ไฟฟ้าหลายๆเครื่อง อาจสร้างองค์ประกอบจำลองโดยประมาณเป็นแหล่งจ่ายแรงดันอนุกรมกับอิมพีแดนซ์เท่านั้น การเลือกใช้องค์ประกอบจำลองขึ้นอยู่กับชนิดของงาน การวิเคราะห์และที่ตั้งขององค์ประกอบ ซึ่งอาจอยู่ในบรเวณที่มีความสำคัญมากน้อยไม่เท่ากัน เช่น โหลดทางด้านแรงต่ำอาจมีความสำคัญไม่มากนักในการวิเคราะห์ทางด้านแรงดันสูง จึงอาจใช้วงจรสมมูลแบบง่ายๆได้ เช่น เป็นค่าอิมพีแดนซ์เพียงตัวเดียว องค์ประกอบต่างๆของส่วนระบบวงจรไฟฟ้าจะถูกสร้างให้เป็นวงจรอิมพีแดนซ์สมมูล (Equivalent Impedance Circuit) เพื่อนำมาใช้แก้สมการแรงดันปม(Node voltage Equation) ที่เวลาΔt ต่างๆ โดยเริ่มตั้งแต่เวลา t=0, Δt, $2\Delta t$,.. ไปเรื่อยๆจนถึงเวลาสูงสุดที่กำหนดไว้ องค์ประกอบที่สำคัญในระบบวงจรไฟฟ้าได้แก่ สายส่งและเคเบิล ตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ ตัวต้านทาน แหล่งจ่ายพลังงาน ตัวประกอบแบบไม่เชิงเส้น

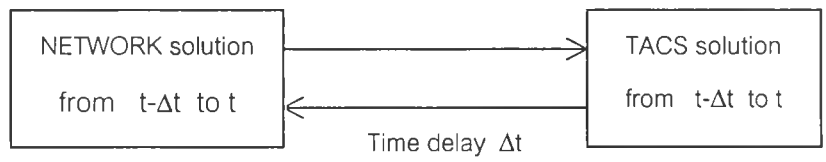
3) ระบบควบคุม (Control System) แบ่งเป็น 2 องค์ประกอบใหญ่ๆ ได้แก่ TACS และ MODELS ซึ่งแยกออกต่างหากจากตัวโปรแกรม EMTP แต่สามารถติดต่อผ่านกันได้ด้วยการส่งข้อมูลแรงดันปม และกระแส และส่งกลับมาเป็นสัญญาณควบคุมผ่านองค์ประกอบควบคุม เช่น สวิตช์ควบคุมด้วยสัญญาณTACS (TACS Switch) ความต้านทานควบคุมด้วยสัญญาณTACS (R-TACS)

3.1.1 TACS[31]

ในตอนแรก TACS ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อจะทำหน้าที่จำลองแบบระบบควบคุมคอนเวอร์เตอร์ในระบบ HVDC และถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการจำลองแบบระบบต่างๆมากมาย เช่น การจำลองการเกิดอาร์กในเซอร์กิตเบรกเกอร์ การจำกัดกระแสของแกปในกับดักฟ้าผ่า(Surge Arrester) รวมถึงอุปกรณ์และปรากฏการณ์ต่างๆที่ไม่สามารถใช้องค์ประกอบทางไฟฟ้าทั่วไปใน EMTP จำลองได้

TACS ได้รับการออกแบบเพื่อใช้จำลองระบบควบคุมที่มีลักษณะเชิงเส้น โดยจำลองในรูปแบบของบล็อกไดอะแกรม การคำนวณในTACS และระบบวงจรไฟฟ้าใน EMTP จะคำนวณแยกจากกัน และการติดต่อระหว่าง TACS กับระบบวงจรไฟฟ้าใน EMTP เป็นไปในแบบทิศทางเดียว โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณในระบบวงจรไฟฟ้าในEMTP จะถูกส่งเป็นสัญญาณขาเข้า

สำหรับ TACS แต่ผลลัพธ์ที่คำนวณได้จากTACS จะถูกส่งเป็นสัญญาณขาเข้าแก่ระบบวงจรไฟฟ้าในรอบการคำนวณถัดไป ทำให้เกิดความล่าช้าในการส่งผลลัพธ์ที่คำนวณได้เป็นเวลา Δt เวลาล่าช้าของสัญญาณควบคุมจากTACSนี้อาจส่งผลให้เกิดความไม่เสถียรในการคำนวณได้ อย่างไรก็ตามสามารถใช้ TACS จำลองระบบควบคุมได้โดยไม่ต้องกังวลถึงเวลาล่าช้าของสัญญาณควบคุมเพราะในสภาวะความเป็นจริงย่อมมีความล่าช้าจากการส่งสัญญาณอยู่แล้ว สามารถลดเวลาล่าช้าได้โดยลดค่า Δt ลงให้น้อยที่สุด



รูปที่ 3.2 การติดต่อระหว่างวงจรไฟฟ้า กับ TACS

3.1.2 MODELS[31]

MODELS เป็นภาษาคอมพิวเตอร์ภาษาหนึ่งซึ่งถูกสร้างขึ้นเพื่อใช้แก้สมการในโดเมนเวลา ใช้สำหรับจำลองระบบที่สัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาและมีความซับซ้อนสูง สามารใช้จำลองทั้งองค์ประกอบทางไฟฟ้าและองค์ประกอบสำหรับการควบคุม ใช้เป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณหรือวัดสัญญาณจากระบบวงจรไฟฟ้า และยังใช้เป็นตัวติดต่อระหว่าง EMTP กับโปรแกรมอื่นได้อีกด้วย

MODELS นั้นถูกสร้างขึ้นมาเพื่อใช้สร้างโมเดลที่มีความซับซ้อนสูงซึ่งไม่สามารถใช้องค์ประกอบที่มีอยู่ใน TACS สร้างขึ้นได้โดยง่าย เช่น ที่ประกอบด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อน MODELS สามารถกำหนดค่าเริ่มต้น(initial state)ของพารามิเตอร์ได้ มีความยืดหยุ่นในลักษณะของภาษาคอมพิวเตอร์จึงช่วยให้การติดต่อทั้งระหว่างตัว MODELS เองและโปรแกรมภายนอกกับองค์ประกอบใน EMTP ทำได้ง่ายโดยไม่จำเป็นต้องมีความรู้เบื้องลึกในการทำงานของ EMTP

3.2 แบบจำลองเบรกดาวน์

แบบจำลองเบรกดาวน์ถูกสร้างขึ้นเพื่อหาเวลาเบรกดาวน์เมื่อมีแรงดันอิมพัลส์คร่อมอิเล็กโตรดและเกิดสูญเสียสภาพการเป็นฉนวนขึ้น ในที่นี้จะกล่าวถึงแบบจำลองเบรกดาวน์เฉพาะกรณีแกปอากาศเท่านั้น

3.2.1 อินทิเกรชันโมเดล

ใช้หลักการที่ว่า เมื่อแรงดันอิมพัลส์มีค่ามากกว่าแรงดันวิกฤติ V_o ก็จะทำให้อุปกรณ์เริ่มสูญเสียสภาพความเป็นฉนวนจนในที่สุดก็เกิดเบรกดาวน์ขึ้น สภาพความทนได้ของฉนวนของอุปกรณ์ที่เกิดจากการรับรูปคลื่นแรงดันใดๆ สามารถแทนด้วยค่าคงที่ค่าหนึ่งซึ่งก็คือ Disruptive Effect (DE) ซึ่งค่า DE สามารถหาได้ดังสมการ

$$DE = \int_{T_o}^{T_B} (V(t) - V_O)^k \, dt \qquad (3.1)$$

โดย V(t) คือ รูปคลื่นแรงดันที่ตกคร่อมแกป V_o คือ แรงดันวิกฤติที่เริ่มทำการอินทิเกรท เมื่อ V(t) มีค่ามากกว่า V_o ที่เวลา T_o T_B คือเวลาที่ผลการอินทิเกรทมีค่าเท่ากับ DE ซึ่งก็คือสูญเสียสภาพการเป็นฉนวน หรือเกิดเบรกดาวน์นั่นเอง ทั้ง DE, V_o และ k เป็นค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับลักษณะของอิเล็กโตรด และลักษณะของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ สำหรับการพิสูจน์สมการอินทิกรัลอันนี้นั้น Darveniza ได้เสนอทฤษฎีที่ใช้อธิบายสมการอินทิกรัลข้างต้น 2 ทฤษฎี ได้แก่ Physical Model และ Energy Balance Model ซึ่งศึกษาเพิ่มเติมได้จาก [7] ค่าตัวแปรทั้ง 3 ตัวข้างต้นสามารถหาได้จากการแก้สมการอินทิกรัลที่เกิดจากรูปคลื่นอิมพัลส์หลายๆรูปคลื่นกับข้อมูลเวลาเบรกดาวน์จากเส้นโค้งแรงดัน-เวลาที่ได้จากการทดลองจริง โดยถือว่าเมื่อป้อนรูปคลื่นอิมพัลส์ที่มีขั้วแรงดันเหมือนเดิมเข้าอิเล็กโตรดอันหนึ่งย่อมให้ค่า DE หรือสภาพความทนได้ของฉนวนเท่าเดิม เช่น ไม่ว่าจะป้อนรูปคลื่น 1.2/50 μs หรือ 5/50 μs ที่มีค่ายอดแรงดันเท่าไรก็ตามย่อมต้องให้ค่า DE เท่ากัน สมการที่ (3.2) แสดงสมการอินทิกรัลที่เกิดจากการใช้รูปคลื่นอิมพัลส์ 2 รูป ได้แก่ V1(t) และ V2(t) กับเวลาเบรกดาวน์ T_{B1} และ T_{B2} ที่ได้จากเส้นโค้งแรงดัน-เวลาเพื่อแก้สมการหาค่า DE, V_o และ k

$$DE = \int_{T_{o1}}^{T_{B1}} (V1(t) - V_O)^k \, dt = \int_{T_{o2}}^{T_{B2}} (V2(t) - V_O)^k \, dt \qquad (3.2)$$

การแก้สมการข้างต้นเพื่อหาค่าคงที่ DE, V_o และ k นั้นสามารถใช้ระเบียบวิธีเชิงเลข (Numerical Method) เช่น วิธี Newton-Raphson เพื่อหาค่าได้ แต่ก็ยังเป็นการยากที่จะได้คำตอบที่ถูกต้อง จึงมีผู้นำเสนอวิธีเลือกพารามิเตอร์ในรูปแบบที่ง่ายขึ้น [15] ได้แก่

1. k=2 และ V_o คือ corona inception voltage ผลการอินทิเกรทจะเป็นสัดส่วนกับประจุที่ไหลเข้าสู่แกป ตามความสัมพันธ์กำลังสองระหว่างกระแสโคโรน่า กับแรงดันที่ป้อน ซึ่งก็คือเบรกดาวน์จะเกิดขึ้นเมื่อประจุที่ไหลเข้ามีค่าเกินค่าวิกฤต

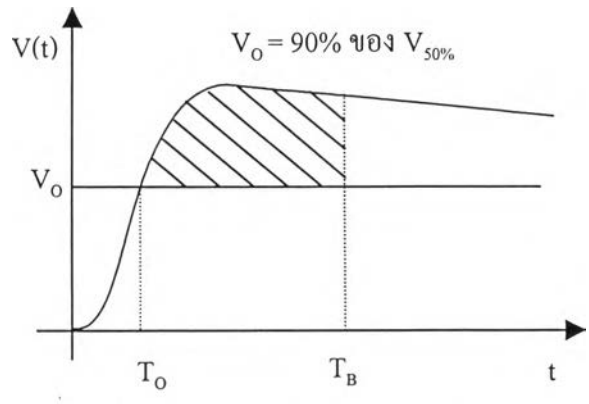
2. k=1 ซึ่งคือหลักการ equal-area criterion โดยพื้นที่ที่อินทิเกรทเป็นสัดส่วนกับการขยายตัวของลีดเดอร์ ตามความสัมพันธ์เชิงเส้นของความเร็วลีดเดอร์ กับแรงดันที่ตกคร่อมอิเล็กโตรด ในกรณีนี้ V_o เป็นค่า inception voltage ของลีดเดอร์

3. ค่า T_o=0 และ V_o=0 แต่ก็พบว่าให้ผลที่คลาดเคลื่อนเป็นอย่างมาก[6,15]

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยของ Darveniza[7] ซึ่งได้เสนอว่า ถ้าเลือก $0 \le V_O \le V_{50\%}$ ให้ใช้ $3 \le k \le 5$ ถ้าเลือก V_O=90% ของ $V_{50\%}$ ให้ใช้ $k \le 1$

อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าจะเป็นรูปแบบที่ง่ายแล้วข้างต้น การหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆข้างต้นให้ครบทุกตัวก็ยังทำได้ยาก มีเพียงบางงานวิจัยเท่านั้นที่นำเสนอวิธีหาค่า k, V_O , DE ทั้ง 3 ตัวนี้ โดยงานวิจัยส่วนใหญ่เน้นไปที่อิเล็กโตรดแบบ rod-rod กับ rod-plane และแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นมาตรฐาน 1.2/50 μs

3.2.1.1 **โมเดลของ** Sekioka [9]



รูปที่ 3.3 **อินทิเกรชันโมเดลของ** Sekioka

Sekioka เสนอให้ใช้ k=1 ค่า V_O ประมาณด้วยค่า 90% ของ $V_{50\%}$ โดย $V_{50\%}$ คือระดับแรงดันที่ทำให้ฉนวนมีโอกาสเบรกดาวน์โดยมีจำนวนครั้งที่เบรกดาวน์เป็นครึ่งหนึ่งของจำนวนครั้งที่ป้อนแรงดันทั้งหมด สำหรับค่าของ DE กรณีอิเล็กโตรดแบบ rod-rod หาได้จากสมการต่อไปนี้ โดย D คือระยะแกป (m)

ขั้วบวก $DE = 0.65D - 0.04$ (3.3)

ขั้วลบ $DE = 0.61D - 0.15$ (3.4)

3.2.1.2 **โมเดลของ** Chowdhuri, Mishra **และ** McConnell [2,8]

$$DE = \int_{T_o}^{T_B} (V(t) - V_0)^{\alpha \frac{V(t)}{V_O}} dt \quad (3.5)$$

สมการนี้นำเสนอเงื่อนไขในการเกิดเบรกดาวน์ที่แตกต่างออกไปจากเดิม คือ ค่า DE,α และ V_O เป็นค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับลักษณะรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ด้วย ถ้าเปลี่ยนลักษณะของแรงดันอิมพัลส์ที่ป้อนเข้าอิเล็กโตรดอันเดิม เช่น เปลี่ยนเวลาหน้าคลื่นหรือหลังคลื่น ก็จะทำให้ได้ค่า DE, α และ V_O ที่แตกต่างกัน

โมเดลนี้ใช้หลักการที่ว่า กระบวนการเกิดเบรกดาวน์ในแกปเป็นกระบวนการปลดปล่อยพลังงาน โดยจะเริ่มปล่อยพลังงานเมื่อแรงดันคร่อมแกปมีค่าเกินระดับแรงดันที่ทำให้เกิดไอออไนเซชั่นซึ่งแทนด้วย V_o นั่นเอง V_o จึงเป็นค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับลักษณะของแรงดันโดยหาค่าได้จากการทดลอง อัตราการปล่อยพลังงานแทนด้วยค่า k ถ้า k=2 คือ อัตราการปล่อยพลังงานเป็นแบบคงที่ แต่เนื่องจากในความเป็นจริงแล้วการปล่อยพลังงานเป็นแบบไม่คงที่ขึ้นกับลักษณะการเกิดพลาสมา ดังนั้น k จึงขึ้นกับลักษณะการเกิดพลาสมาในแกป และเพราะว่าความเร็วในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากกระบวนการไอออไนเซชั่นย่อมขึ้นกับสนามไฟฟ้าในแกป ดังนั้น k จึงเป็นฟังก์ชันของแรงดันขณะเวลาใดๆและระดับแรงดันที่ยังไม่ทำให้เกิดกระบวนการไอออไนเซชั่นจึงแทนค่า k ด้วย $\alpha V(t)/V_o$ โดย α เป็นค่าคงที่ค่าหนึ่ง และแน่นอนว่าอัตราการปลดปล่อยพลังงานในแกปย่อมขึ้นกับลักษณะการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน ดังนั้น DE จึงเป็นฟังก์ชันของลักษณะรูปคลื่น

เนื่องจาก V_o เป็นค่ายอดแรงดันอิมพัลส์ที่ทำให้ความน่าจะเป็นในการเกิดเบรกดาวน์มีค่าน้อยมากๆเมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ที่มีเวลาหน้าคลื่นและหลังคลื่นเหมือนเดิมกับอิเล็กโตรดชนิดเดิม ดังนั้น V_o ก็คือ $V_{0\%}$ นั่นเอง ถ้ารู้ $V_{50\%}$ และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน σ ก็สามารถหา $V_{0\%}$ ได้จาก $V_{0\%}= V_{50\%}-3\sigma$ และเมื่อได้ค่า V_o แล้ว หาค่าคงที่ DE และ α ได้จากการแก้สมการอินทิกรัลของแรงดันอิมพัลส์ที่มีเวลาหน้าคลื่นและหลังคลื่นแน่นอนค่าหนึ่งกับเส้นโค้งแรงดัน-เวลาที่ได้จากการทดลอง

3.2.1.3 โมเดล V_o แปรตามเวลา

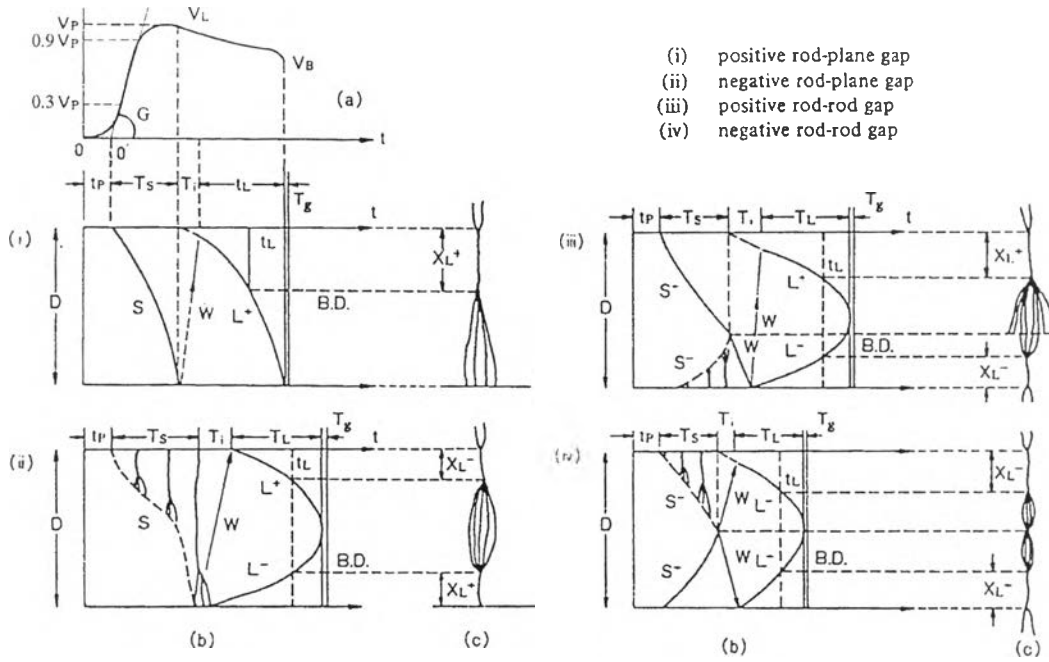
โมเดลนี้เป็นโมเดลที่ผู้วิจัยประยุกต์มาจากอินทิเกรชันโมเดลแบบที่ใช้ค่า k=1 ซึ่งใช้หลักการของ equal-area criterion ที่ว่า พื้นที่ที่อินทิเกรทจะเป็นสัดส่วนกับการขยายตัวของลีดเดอร์ตามความสัมพันธ์เชิงเส้นของความเร็วลีดเดอร์ เนื่องจากการขยายตัวของลีดเดอร์ทำให้ระยะแกปแคบลงเรื่อยๆ ดังนั้นค่า V_o ซึ่งเป็นค่าแรงดันต่ำสุดที่จะทำให้ลีดเดอร์เคลื่อนที่ต่อไปได้ก็ต้องเปลี่ยนไปด้วย เพราะค่าแรงดัน V_o ย่อมเปลี่ยนตามระยะแกปที่เปลี่ยนไป นั่นก็คือเมื่อเริ่มเกิดลีดเดอร์แล้ว V_o ควรจะมีค่าลดลงตลอดเวลาจนกระทั่งเกิดเบรกดาวน์ จึงได้เสนอสมการอินทิกรัลที่ V_o เปลี่ยนแปลงตามเวลาดังสมการ

$$DE = \int_{T_o}^{T_B}(V(t) - b \cdot V_{50\%}(1 - t^a))dt \qquad (3.6)$$

V(t) เป็นรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่า T_B คือเวลาเบรกดาวน์ T_O คือเวลาที่รูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่ามีค่าเท่ากับ $bV_{50\%}$ ตามสมการ $V(T_O)= bV_{50\%}$ $V_{50\%}$คือค่ายอดแรงดันอิมพัลส์ของรูปคลื่นอิมพัลส์รูปใดรูปหนึ่งที่มีโอกาสเบรกดาวน์ที่ค่ายอดแรงดันดังกล่าวเป็น 50% ค่า a และ b เป็นค่าคงที่ และ V_o ก็คือ $b \cdot V_{50\%}(1 - t^a)$ ค่า DE,a,b หาได้จากการแก้สมการอินทิกรัลของแรงดันอิม

พัลส์หลายๆรูปคลื่น โดยต้องให้ผลต่างของค่าเวลาเบรกดาวน์น้อยที่สุดยกกำลัง a กับเวลาเบรกดาวน์มากสุดยกกำลัง a มีค่าน้อยที่สุด เช่นรูปคลื่นอิมพัลส์ 2 รูปคลื่นที่มีเวลาเบรกดาวน์มากสุดและน้อยสุดจากเส้นโค้งแรงดัน-เวลาที่ได้จากการทดลองเป็น $T_{B,min}$ และ $T_{B,max}$ ต้องแก้สมการอินทิกรัลโดยให้ค่า $T^a_{B,max} - T^a_{B,min}$ มีค่าน้อยที่สุด และโมเดลแบบใหม่นี้ใช้หลักการที่ว่าค่า DE และ b จะมีค่าคงที่สำหรับอิเล็กโตรดชนิดหนึ่ง ไม่ว่าจะป้อนรูปคลื่นอิมพัลส์ลักษณะใดก็ตาม

3.2.2 ลีดเดอร์โมเดล



รูปที่ 3.4 เบรกดาวน์ใน rod-plane และ rod-rod [12]

ลีดเดอร์โมเดลได้พัฒนามาจากการลักษณะการเกิดลีดเดอร์ก่อนที่จะเกิดเบรกดาวน์ โดยเน้นที่ขณะเริ่มเกิดลีดเดอร์ และความเร็วลีดเดอร์ที่จะทำให้ลีดเดอร์เคลื่อนที่ผ่านทั้งแกปและเกิดเบรกดาวน์ต่อไป ลักษณะการเกิดเบรกดาวน์บนอิเล็กโตรดแบบ rod-plane และ rod-rod เนื่องจากแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าทั้งขั้วบวกและลบ ซึ่งได้จากการวิจัยในอดีต[12] แสดงดังรูปที่ 3.4 โดย (a) เป็นแรงดันอิมพัลส์ที่ป้อน, (b) คือกระบวนการเบรกดาวน์, (c) การขยายตัวของสตรีมเมอร์และลีดเดอร์ที่เวลา T_L ,s คือสตรีมเมอร์, w คือ Ionizing Waves, L คือลีดเดอร์, B.D. คือ เกิดเบรกดาวน์

สามารถอธิบายการเกิดเบรกดาวน์เนื่องจากลีดเดอร์ได้ดังนี้ เมื่อแรงดันอิมพัลส์เพิ่มขึ้นจนถึงค่าๆหนึ่ง ก็จะเริ่มเกิดสตรีมเมอร์จากบริเวณปลายร็อดไปยังแกป เมื่อสตรีมเมอร์เคลื่อนที่ข้ามทั้งแกปแล้วจะเกิด Ionizing Waves เคลื่อนที่บนลำสตรีมเมอร์ เมื่อ Ionizing Waves เคลื่อนที่ถึงบริเวณที่มีสภาพนำไฟฟ้าสูงใกล้ๆอิเล็กโตรดก็จะเกิดลีดเดอร์ขึ้น ถ้าแรงดันตกคร่อม

แกปยังคงสูงพอ ลีดเดอร์ก็จะขยายตัวออกไปจนกระทั่งข้ามทั้งแกปและนำไปสู่การเกิดอาร์คตามกระบวนการแตกตัวของก๊าซเนื่องจากความร้อนต่อไป

เวลาที่ใช้ในการเกิดเบรกดาวน์ T_B คือ ผลรวมของเวลาที่ใช้ในการเริ่มเกิดสตรีมเมอร์ (streamer-onset time,T_P) เวลาที่สตรีมเมอร์เคลื่อนที่(streamer-developing time,T_S) เวลาที่ ionizing wave เคลื่อนที่(wave-propagating time,T_i) เวลาที่ลีดเดอร์ใช้เคลื่อนที่(leader-developing time,T_L) และเวลาที่ก๊าซใช้ในการเกิดไอออไนเซชั่นเนื่องจากความร้อน(gas heating time, T_g)[11-12,14] โดยเขียนได้ดังสมการที่ (3.6)

$$T_B = T_P + T_S + T_i + T_L + T_g \tag{3.7}$$

T_P สามารถประมาณได้โดยวัดจากเวลาที่ค่าแรงดันเป็นศูนย์จริง (จุด O) ถึงจุด virtual zero(O') [11-12,14] ซึ่งสามารถหาจุด O' ได้จากการลากเส้นเชื่อมจุด 2 จุดบนหน้าคลื่นแรงดันคือจุด 30% และ 90% ของค่ายอดแรงดันไปตัดกับแกนเวลา

T_i มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับเวลาอื่นๆ ยกเว้นกรณีที่อิมพัลส์ฟ้าผ่ามีแรงดันใกล้กับแรงดันเบรกดาวน์ 50% ลีดเดอร์จะเริ่มเกิดที่ระยะห่างจากปลายร็อดประมาณ 1 ใน 5 หรือ 1 ใน 10 ของความยาวแก็ป เมื่อลากประมาณเส้นโค้งของทางเดินของลีดเดอร์จะได้ว่า เวลาที่ลีดเดอร์เริ่มเกิดเป็นเวลาที่สตรีมเมอร์เคลื่อนที่ข้ามทั้งแกป จึงประมาณได้ว่า ลีดเดอร์เริ่มเกิดหลังเวลา T_S ทันที

T_g ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่นับจากจุดเริ่มต้นของ final return ionizing wave จนถึงเวลาที่เกิด arc phase นั้น จากการวัดพบว่ามีค่าน้อยกว่า 0.1 μs ดังนั้นสามารถละเลยได้

เนื่องจากในการสร้างเส้นโค้งแรงดัน-เวลา เริ่มนับเวลาในการเกิดเบรกดาวน์จากจุด O' ดังนั้นสามารถตัด T_P ทิ้งได้ และสามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังสมการ

$$T_B = T_S + T_L \tag{3.8}$$

T_B คือเวลาที่ลีดเดอร์เคลื่อนที่ผ่านทั้งแกป มีผู้นำเสนอวิธีการหาเวลาเบรกดาวน์ T_B จากสมการความเร็วลีดเดอร์อยู่หลายแบบได้แก่

3.2.2.1 โมเดลของ Shindo และ Suzuki [12]

โมเดลนี้ใช้ได้กับแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นใดๆ และใช้สำหรับอิเล็กโตรดแบบ rod-rod กับ rod-plane เท่านั้น โดยกรณีอิเล็กโตรดแบบ rod-plane ใช้ได้เฉพาะขั้วบวกเท่านั้น เริ่มคำนวณโดยหา T_s เพื่อหาจุดที่จะเริ่มคำนวณความยาวลีดเดอร์ จากสมการ

$$T_s = A/\left(\frac{V_p}{D} - B\right) \tag{3.9}$$

T_S มีหน่วยเป็น μs, V_p คือค่ายอดแรงดันอิมพัลส์หน่วยเป็น MV, D มีหน่วยเป็น m A,B เป็นค่าคงที่ ซึ่งขึ้นกับลักษณะของอิเล็กโตรดและขั้วของแรงดันอิมพัลส์ โดยมีค่าดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงค่า A,B ที่ใช้ในการหา T_S[12]

ขั้วแรงดันอิมพัลส์	ลักษณะของอิเล็กโตรด	A	B
+	Rod-Plane	0.5	0.3
+	Rod-Rod	0.5	0.42
-	Rod-Rod	0.5	0.5

แต่เนื่องจากการหาค่า T_S ตามสมการข้างต้นนั้นต้องรู้ค่ายอดของแรงดันอิมพัลส์และจุดที่ถือว่าเป็นจุดเริ่มของแรงดันอิมพัลส์ซึ่งยากที่จะทราบได้ในทางปฏิบัติ จึงมีผู้เสนอให้เริ่มคำนวณความยาวลีดเดอร์เมื่อแรงดันคร่อมแกปมีค่าเกินค่าวิกฤติ V_C [16-17] โดยหาค่าV_C ในกรณีอิเล็กโตรดแบบ rod-rod ได้ดังสมการ

$$V_C=PD+Q \tag{3.10}$$

โดย D คือ ระยะแกป (m), P = 550 kV/m และ Q = 80 kV เมื่อ $D \leq 3m$, P = 500 kV/m และ Q = 200 kV เมื่อ $3m < D < 7.5m$

จากนั้นคำนวณความเร็วลีดเดอร์จากสมการความเร็วลีดเดอร์ และกระแสลีดเดอร์ดังสมการ

ตารางที่ 3.2 สมการความเร็วของลีดเดอร์

Pol	Electrode	Formula	Constant
+	R-P	$v = k_1 \frac{V^2(t)}{D-x} + k_2\left(\frac{V(t)\cdot i}{D-x}\right)\left(\frac{x}{D}\right)$	$k_1 = 2\times10^{-7}\ \ m^2/V^2s$ $k_2 = 3\times10^{-3}\ \ m^2/VAs$
+	R-R	$v = k_1 \frac{V^2(t)}{D-2x} + k_2\left(\frac{V(t)\cdot i}{D-2x}\right)\left(\frac{x}{D}\right)$	$k_1 = 1\times10^{-7}\ \ m^2/V^2s$ $k_2 = 2.5\times10^{-3}\ \ m^2/VAs$
-			$k_1 = 0.5\times10^{-7}\ \ m^2/V^2s$ $k_2 = 5\times10^{-3}\ \ m^2/VAs$

$$i = CV(t)v \tag{3.11}$$

v คือความเร็วของลีดเดอร์ (m/s), V(t) คือแรงดันที่ตกคร่อมแกป (Volt), x คือความยาวของลีดเดอร์ที่วัดจากอิเล็กโตรดหนึ่งข้าง (m), D คือระยะแกป (m), i คือกระแสลีดเดอร์ (A), C คือค่าความจุไฟฟ้าของแกปต่อหน่วยความยาวของลีดเดอร์ กำหนดให้มีค่า 0.5 nF/m

เมื่อได้ความเร็วและกระแสลีดเดอร์แล้ว สามารถคำนวณหาความยาวของลีดเดอร์ได้จาก

$$x(t+\Delta t) = x(t) + v \cdot \Delta t \tag{3.12}$$

โดย v คือความเร็วของลีดเดอร์ที่ได้จากการคำนวณที่เวลา t, x(t+Δt) คือความยาวลีดเดอร์ที่เวลา Δt ถัดมา

การคำนวณจะสิ้นสุดลงได้จาก 2 กรณี กรณีที่หนึ่งคือเมื่อความยาวของลีดเดอร์มีค่าเท่ากับระยะแกปซึ่งก็คือกรณีที่เกิดเบรกดาวน์ กรณีที่สองคือแรงดันคร่อมแกปมีค่าน้อยกว่า V_{min} เพราะจะทำให้ค่าสนามไฟฟ้าที่ตกคร่อมแกปมีค่าไม่สูงพอที่สตรีมเมอร์บริเวณส่วนหัวของลีดเดอร์จะดำเนินต่อไปได้ ลีดเดอร์ก็จะหยุดลงซึ่งก็คือกรณีที่ไม่เกิดเบรกดาวน์ สามารถคำนวณหา V_{min} ได้จากสมการ

$$V_{min} = E_0(D - \text{leader length}) \tag{3.13}$$

ค่า E_0 ในกรณีอิเล็กโตรดแบบ rod-rod มีค่าเท่ากับ 450 kV/m กรณี rod-plane มีค่าเท่ากับ 400 kV/m, D คือระยะแกป (m), ความยาวลีดเดอร์กรณี rod-rod คือ 2x กรณี rod-plane คือ x

3.2.2.2 โมเดลของ Hideki Motoyama [14]

โมเดลนี้ถูกเสนอเพื่อใช้กับแรงดันอิมพัลส์ที่มีหางคลื่นสั้น โดยในงานวิจัย[14] ใช้กับอิมพัลส์ที่มีเวลาหน้าคลื่นอยู่ในช่วง 1-1.4 μs และเวลาหลังคลื่นอยู่ในช่วง 3.2-4 μs สำหรับอิเล็กโตรดแบบ rod-rod เท่านั้น เริ่มคำนวณหา T_s เพื่อหาจุดที่จะเริ่มคำนวณความยาวลีดเดอร์ จากสมการ

$$\frac{1}{T_s}\int_0^{T_s} V(t)dt = V_{ave} > K \tag{3.14}$$

โดย K มีค่าดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ค่า K สำหรับแกปแบบ rod-rod

ขั้วแรงดันอิมพัลส์	K
+	400D+50 (kV)
-	460D+150 (kV)

คำนวณกระแสลีดเดอร์ ความเร็วลีดเดอร์ ความยาวลีดเดอร์ และแรงดันน้อยสุดที่ทำให้ลีดเดอร์เคลื่อนที่ต่อไปได้ดังสมการต่อไปนี้และแสดงค่าคงที่ต่างๆ ดังตารางที่ 3.4

$$i = 2 \cdot k_0 \cdot v \tag{3.15}$$

$$v = k_1\left\{\frac{V(t)}{D-2x} - E_0\right\} \tag{3.16}$$

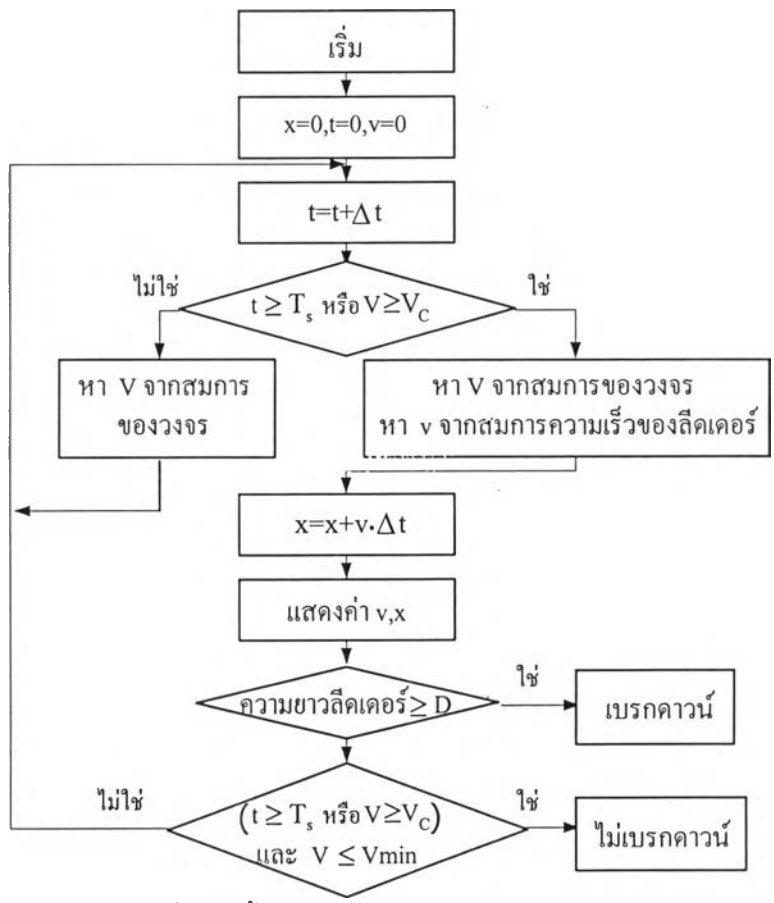
$$x(t+\Delta t) = x(t) + v \cdot \Delta t \tag{3.17}$$

$$V_{min} = E_0(D - 2x) \tag{3.18}$$

ตารางที่ 3.4 ค่าคงที่สำหรับคำนวณกระแสและความเร็วลีดเดอร์

k_0 ($\mu C/m$)	k_1 (m^2/Vs)	E_0 (kV/m)
410	2.5 ($0 \le x < D/2$) 0.42($D/2 \le x \le D$)	750

สามารถแสดงขั้นตอนการหาเวลาเบรกดาวน์ของทั้งสองโมเดลขั้นต้นได้ดังภาพ



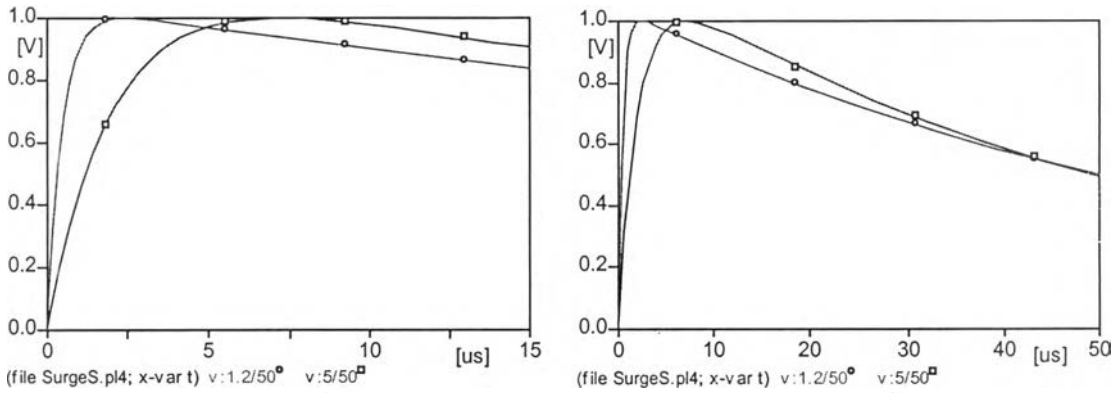
รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการคำนวณเวลาเบรกดาวน์

3.3 การสร้างแบบจำลองเบรกดาวน์ในโปรแกรม EMTP

สร้างโมเดลเบรกดาวน์ในโปรแกรม EMTP โดยใช้องค์ประกอบในโปรแกรม ได้แก่ TACS และ MODELS โดยเลือกใช้ TACS สร้างอินทิเกรชันโมเดลขึ้นเพราะอินทิเกรชันโมเดลไม่ซับซ้อนนัก สามารถใช้องค์ประกอบใน TACS สร้างขึ้นได้โดยง่าย และใช้ MODELS สร้างลีดเดอร์โมเดล

เพราะลีดเดอร์โมเดลมีความซับซ้อนสูงกว่ามาก ไม่สามารถจำลองสมการความเร็วลีดเดอร์ด้วย TACS ได้โดยง่าย

สร้างรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าเพื่อป้อนเข้าสู่โมเดลเบรกดาวน์โดยตรง โดยใช้แหล่งกำเนิดแรงดันเสิร์จ(type15) ซึ่งสร้างแรงดันอิมพัลส์ตามสมการ $V(t)=V_p*A(e^{-at}-e^{-bt})$ V_p คือค่ายอดแรงดันอิมพัลส์ที่ต้องการ A,a, และb เป็นค่าคงที่ ในกรณีรูปคลื่น 1.2/50 μs ใช้ค่า A=1.045, a=14743, $b=1.9921*10^6$ และกรณีรูปคลื่น 5/50μs ใช้ค่า A=1.174, $a=1.738*10^4$, $b=4.828*10^5$ จะได้รูปคลื่น 1.2/50 μs และ 5/50 μs เมื่อให้ $V_p=1$ ดังรูปที่ 3.6

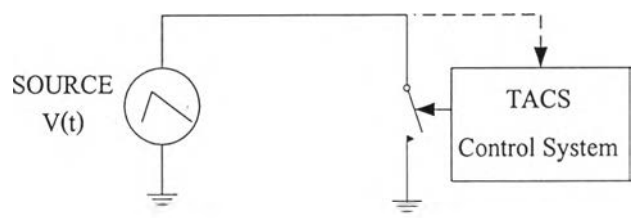


ก) หน้าคลื่น ข) หลังคลื่น

รูปที่ 3.6 แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่น 1.2/50 μs และ 5/50 μs

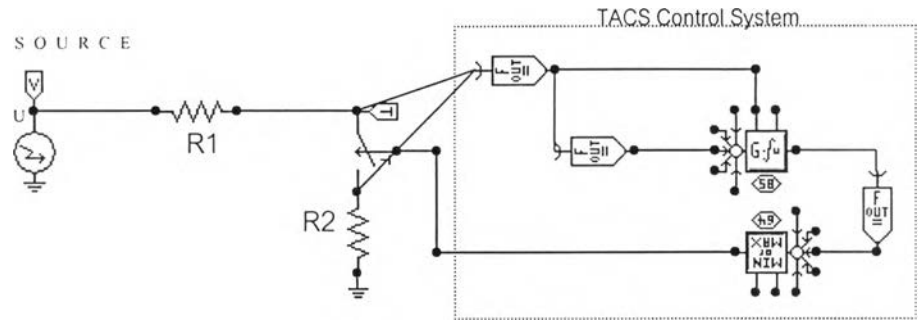
3.3.1 อินทิเกรชันโมเดล

การจำลองการเกิดเบรกดาวน์ด้วยอินทิเกรชันโมเดลในโปรแกรม EMTP ทำได้โดยการแทนแกปด้วย TACS สวิตช์ (type13) [31] โดยใช้ TACS ทำหน้าที่อินทิเกรทสัญญาณแรงดันที่ตกคร่อมแกปหรือสวิตช์ตามสมการอินทิกรัล เมื่อผลการอินทิเกรทมีค่าเกินกว่า DE ก็จะส่งสัญญาณให้สวิตช์ปิด ซึ่งก็คือเกิดเบรกดาวน์ขึ้น



รูปที่ 3.7 การใช้ TACS สร้างอินทิเกรชันโมเดล

I21164745

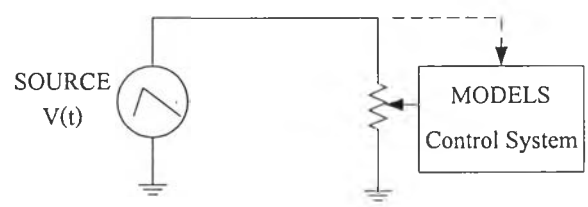


รูปที่ 3.8 ตัวอย่างการใช้ TACS สร้างอินทิเกรชันโมเดล

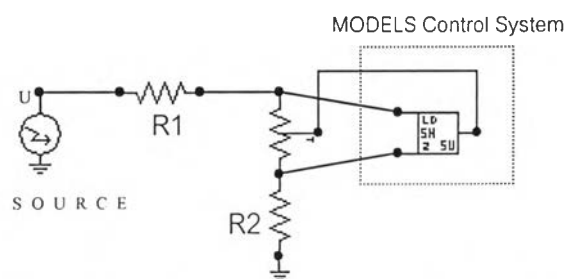
ความต้านทาน R1 และ R2 ในรูปมีค่าน้อยมากประมาณศูนย์ ใส่เพื่อให้โปรแกรม EMTP และ TACS สามารถทำการคำนวณได้ อย่างไรก็ตามเนื่องจากการใช้ TACS สวิตช์ ช่วงก่อนที่จะเกิดเบรกดาวน์จึงไม่มีกระแสไหลผ่านสวิตช์เลย ดังนั้นถึงแม้ว่า R1 หรือ R2 จะมีค่าไม่เป็นศูนย์ก็จะไม่มีแรงดันตกคร่อม R1 หรือ R2 เลย แรงดันที่ตกคร่อมแกปจึงเหมือนกับที่แหล่งกำเนิดแรงดันทุกประการ ไฟล์ข้อมูลของอินทิเกรชันโมเดลแบบต่างๆแสดงในภาคผนวก ฉ.

3.3.2 ลีดเดอร์โมเดล

การจำลองการเบรกดาวน์ด้วยลีดเดอร์โมเดลในโปรแกรม EMTP ทำได้โดยการแทนแกปด้วยความต้านทาน R-TACS (type91) [31] และควบคุมค่าความต้านทานด้วยสัญญาณที่ส่งมาจาก MODELS โดย MODELS จะคำนวณหาความเร็ว, ความยาว และกระแสลีดเดอร์ที่เวลาต่างๆและส่งสัญญาณกลับเป็นค่าความต้านทานของแกปซึ่งหาได้จากแรงดันที่ตกคร่อมแกปหารด้วยกระแสลีดเดอร์ที่เวลานั้นๆ



รูปที่ 3.9 การใช้ MODELS สร้างลีดเดอร์โมเดล



รูปที่ 3.10 ตัวอย่างการใช้ MODELS สร้างลีดเดอร์โมเดล

ความต้านทาน R1 และ R2 ในรูปมีค่าน้อยมากประมาณศูนย์ และใส่เพื่อให้โปรแกรม EMTPและ MODELS สามารถทำการคำนวณได้เช่นกัน อย่างไรก็ตามเนื่องจากการใช้ R-TACS จะทำให้มีกระแสลีดเดอร์ในวงจรด้วย ถ้าค่า R1 หรือ R2 มีค่ามากก็จะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อม R1 และ R2 และแรงดันคร่อมแกปก็จะมีลักษณะไม่เหมือนกับที่ได้จากแหล่งกำเนิด ดังนั้นค่า R1 และ R2 ต้องมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ที่สุด