

บทที่ 2

การวิเคราะห์ฟอลต์บนสายส่ง

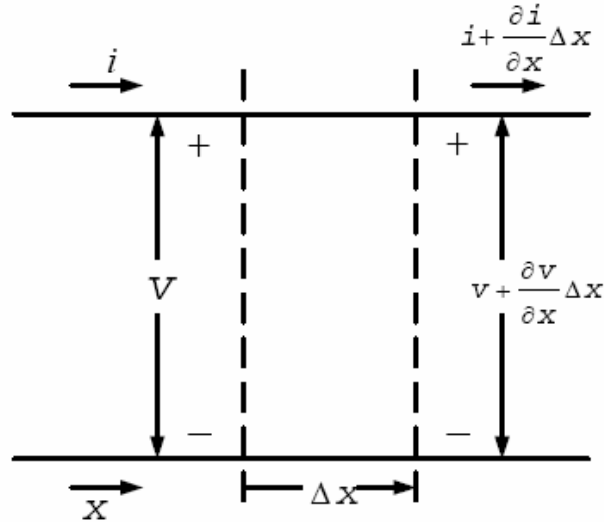
ในปัจจุบันระบบไฟฟ้าได้มีการส่งจ่ายไฟฟ้าโดยใช้ระบบสายส่งวงจรคู่เป็นอย่างมาก ซึ่งสายส่งวงจรคู่ก็มีลักษณะสำคัญโดยการเพิ่มจำนวนสายส่งที่มีอยู่เดิม ดังนั้นการป้องกันจึงเป็นเรื่องที่ยากมากขึ้นตามไปด้วย เมื่อมีฟอลต์เกิดขึ้นบนสายส่งจึงจำเป็นต้องตรวจสอบฟอลต์และระบุตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ขึ้นได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำเพื่อสะดวกในการซ่อมแซมแก้ไขให้ระบบสายส่งกลับเข้ามาใช้งานตามปกติได้อย่างรวดเร็วที่สุด แต่ปัญหาที่เกิดขึ้นในระบบสายส่งวงจรคู่ก็คือส่วนมากเฟสที่เกิดฟอลต์ในวงจรใดวงจรหนึ่งจะมีผลกระทบกับเฟสอีกวงจรที่ไม่มีการเกิดฟอลต์เนื่องจากอิทธิพลที่มีต่อกันทั้ง 2 วงจร หากเกิดฟอลต์ขึ้นในวงจรใดวงจรหนึ่ง วงจรที่ไม่เกิดฟอลต์อาจถูกวินิจฉัยว่าเป็นวงจรที่เกิดฟอลต์ได้จึงต้องมีการออกแบบขั้นตอนในการตรวจสอบฟอลต์ให้ระบบวงจรและตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ให้มีความถูกต้อง ในบทนี้จึงเป็นการกล่าวถึงรูปแบบการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์แบบเดิมเพื่อเป็นพื้นฐานสำหรับความเข้าใจ ซึ่งก่อนที่จะกล่าวถึงหลักการทำงานนั้นจำเป็นต้องกล่าวถึงทฤษฎีที่ใช้ในการอธิบายคลื่นเดินทางดังต่อไปนี้

2.1 ทฤษฎีคลื่นเดินทาง (Traveling wave theory) [2]

การศึกษาเสิร์จ (Surge) บนสายส่งนั้นมีความซับซ้อนมาก ในที่นี้เราจะพิจารณาเฉพาะกรณีของสายส่งที่ไม่คิดความสูญเสียเนื่องจากเป็นแบบการศึกษาที่ดี โดยเฉพาะเมื่อความสูญเสียจากค่า ωL และ ωC มีค่ามากเมื่อเทียบกับค่า R และ G สำหรับเสิร์จไฟฟ้า (Lighting surge) บนสายส่งนั้นเป็นการศึกษาสายส่งแบบความสูญเสียต่ำซึ่งเป็นแบบที่ง่ายต่อการศึกษาในขั้นพื้นฐาน และสามารถทำความเข้าใจในปรากฏการณ์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นโดยไม่ต้องศึกษาทฤษฎีที่มีความซับซ้อนได้ แต่ใช้การวิเคราะห์เช่นเดียวกับการพิสูจน์ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันสำหรับสายส่งแบบยาวด้วยการกระจายแบบคงที่ ซึ่งทำการวัดระยะทาง x ตามความยาวของสายส่งจากปลายด้านส่ง (sending ends) ไปยังส่วนย่อยของความยาวที่แตกต่างกัน Δx ดังแสดงในรูปที่ 2.1

จากรูปที่ 2.1 แรงดัน v และกระแส i เป็นฟังก์ชันของทั้ง x และ t ดังนั้นต้องใช้การหาอนุพันธ์บางส่วน (partial derivative) โดยแรงดันอนุกรมที่ตกคร่อมส่วนย่อยของความยาวคือ

$$i(R\Delta x) + (L\Delta x)\frac{\partial i}{\partial t}$$



รูปที่ 2.1 แสดงแบบจำลองของส่วนย่อยของสายส่ง ฌ. เฟสใดๆ (v และ i เป็นฟังก์ชันของ x และ t)

และสามารถเขียนได้เป็น

$$\frac{\partial v}{\partial x} \Delta x = - \left(Ri + L \frac{\partial i}{\partial t} \right) \Delta x \quad (2.1)$$

เครื่องหมายลบมีความจำเป็นเพราะว่าค่าของ $v + (\partial v / \partial t) \Delta x$ ต้องน้อยกว่าค่าของ v สำหรับค่าบวกของ i และ $\partial i / \partial t$ และในลักษณะเดียวกันจะได้ว่า

$$\frac{\partial i}{\partial x} \Delta x = - \left(Gv + C \frac{\partial v}{\partial t} \right) \Delta x \quad (2.2)$$

เมื่อหารสมการที่ 2.1 และ 2.2 ด้วย Δx โดยสมมติว่าเป็นสายส่งที่มีความสูญเสียต่ำจึงกำหนดให้ R และ G จึงมีค่าเท่ากับศูนย์ดังนั้นสมการที่ 2.1 และ 2.2 จึงมีค่าเป็น

$$\frac{\partial v}{\partial x} = -L \frac{\partial i}{\partial t} \quad (2.3)$$

และ

$$\frac{\partial i}{\partial x} = -C \frac{\partial v}{\partial t} \quad (2.4)$$

ในตอนนี้สามารถกำจัดเทอมของ i ด้วยการหาอนุพันธ์บางส่วนทั้ง 2 เทอมในสมการที่ 2.3 ด้วยตัวแปร x และสมการที่ 2.4 ด้วยตัวแปร t ดังนี้

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = -L \frac{\partial^2 i}{\partial x \partial t} \quad (2.5)$$

และ

$$\frac{\partial^2 i}{\partial x \partial t} = -C \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \quad (2.6)$$

จากขั้นตอนนี้จะได้เทอมของ $\partial^2 i / \partial x \partial t$ ซึ่งมีอยู่ทั้ง 2 ข้างของสมการจะถูกกำจัดออก ดังนั้นจะได้สมการใหม่เป็น

$$\frac{1}{LC} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \quad (2.7)$$

ซึ่งสมการที่ 2.7 นั้นเรียกว่า "สมการคลื่นเดินทางของสายส่งแบบความสูญเสียต่ำ" ผลลัพธ์ของสมการจะเป็นฟังก์ชันของ $x - vt$ และนิพจน์ของแรงดันดังเทอมต่อไปนี้

$$v = f(x - vt) \quad (2.8)$$

ซึ่งฟังก์ชันนี้ไม่ได้มีการอธิบายความหมายแต่ต้องมีค่าเดียว โดยที่ค่าคงที่ v ต้องมีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที ถ้า x มีหน่วยเป็นเมตรและเวลา t มีหน่วยเป็นวินาที เราสามารถพิสูจน์คำตอบของสมการนี้ได้โดยแทนที่อนุพันธ์บางส่วนลำดับสองของ v ลงในสมการที่ 2.7 ในการหาค่า v ในขั้นแรกนั้นต้องทำการเปลี่ยนตัวแปรซึ่งจะได้

$$u = x - vt \quad (2.9)$$

และเขียนได้เป็น

$$v(x, t) = f(u) \quad (2.10)$$

แล้ว

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} &= \frac{\partial f(u)}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial t} \\ &= -v \frac{\partial f(u)}{\partial u} \end{aligned} \quad (2.11)$$

และ

$$\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 f(u)}{\partial u^2} \quad (2.12)$$

ในลักษณะเดียวกันจะได้ว่า

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 f(u)}{\partial u^2} \quad (2.13)$$

แทนค่าอนุพันธ์บางส่วนอันดับ 2 ของ v ในสมการที่ 2.7 ซึ่งจะได้

$$\frac{1}{LC} \frac{\partial^2 f(u)}{\partial u^2} = v^2 \frac{\partial^2 f(u)}{\partial u^2} \quad (2.14)$$

และเมื่อพิจารณาจะพบว่าสมการที่ 2.8 เป็นคำตอบของสมการที่ 2.7 ถ้า

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.15)$$

เทอมของแรงดันในสมการที่ 2.8 คือคลื่นเดินทางในทิศทาง x บวก จากรูปที่ 2.2 แสดงฟังก์ชันของ $x - vt$ ซึ่งคล้ายกับรูปร่างของคลื่นแรงดันคงที่ เดินทางตามความยาวสายส่งซึ่งเกิดจากฟ้าผ่า โดยฟังก์ชันนี้แสดงค่า 2 ค่าของเวลา คือ t_1 และ t_2 ซึ่ง $t_2 > t_1$ เมื่อผู้สังเกตเดินไปกับคลื่นและอยู่ ณ ตำแหน่งเดิมบนคลื่นนั้น ซึ่งพบว่ารูปร่างของคลื่นแรงดันที่เดินทางนี้ยังคงรูปร่างเหมือนเดิมตามสมการที่ 2.16

$$x - vt = \text{a constant} \quad (2.16)$$

จากจุดนี้จะเป็นไปตามสมการที่ 2.17 คือ

$$\frac{dx}{dt} = v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \text{m/s} \quad (2.17)$$

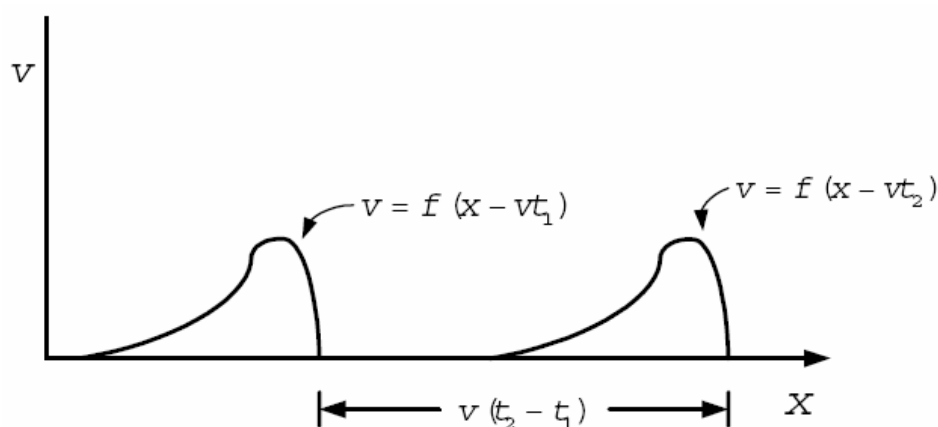
เมื่อ L และ C มีหน่วยเป็น เฮนรีต่อเมตร (H/m) เป็นฟารัดต่อเมตร (F/m) ตามลำดับดังนั้นคลื่นของแรงดันที่เดินทางในทิศทางบวก x ด้วยความเร็ว v

ฟังก์ชันของ $x + vt$ สามารถแสดงเป็นคำตอบของสมการที่ 2.8 และด้วยเหตุผลเดียวกันนี้ สามารถแปลงคลื่นเดินทางในทิศทางลบ x โดยมีสมการคำตอบทั่วไปเป็น

$$v = f_1(x - vt) + f_2(x + vt) \quad (2.18)$$

ซึ่งสมการคำตอบนี้เป็นสิ่งที่เกิดขึ้นพร้อมกันทั้งส่วนที่เดินทางไปด้านหน้า และส่วนที่เดินทางไปด้านหลังบนสายส่ง โดยกำหนดค่าเริ่มต้นและค่าขอบเขตเฉพาะสำหรับส่วนประกอบแต่ละส่วนไว้ ถ้าเราแสดงคลื่นที่เดินทางไปข้างหน้า (Forward traveling wave) ซึ่งเรียกว่า คลื่นอินซิเดนซ์ (incident) ดังสมการที่ 2.19

$$v^+ = f_1(x - vt) \quad (2.19)$$



รูปที่ 2.2 แสดงคลื่นของแรงดันซึ่งเป็นฟังก์ชันของ $x - vt$ ที่เวลา t_1 และ t_2 [2]

คลื่นที่เกิดขึ้นนี้เป็นผลจากการเคลื่อนที่ของประจุและสามารถนิยามได้เป็น

$$i^+ = \frac{1}{\sqrt{L/C}} f_1(x - vt) \quad (2.20)$$

สามารถพิสูจน์ได้โดยแทนที่ค่าของกระแสและแรงดันในสมการที่ 2.3 โดยให้ v เท่ากับ $1/\sqrt{LC}$ ในลักษณะเดียวกันคลื่นที่เคลื่อนที่ไปข้างหลัง (Backward traveling wave) ของแรงดันจะมีสมการดังนี้

$$v^- = f_2(x + vt) \quad (2.21)$$

และลักษณะของกระแส คือ

$$i^- = -\frac{1}{\sqrt{L/C}} f_2(x+vt) \quad (2.22)$$

จากสมการที่ 2.19 และ 2.20 จะได้ว่า

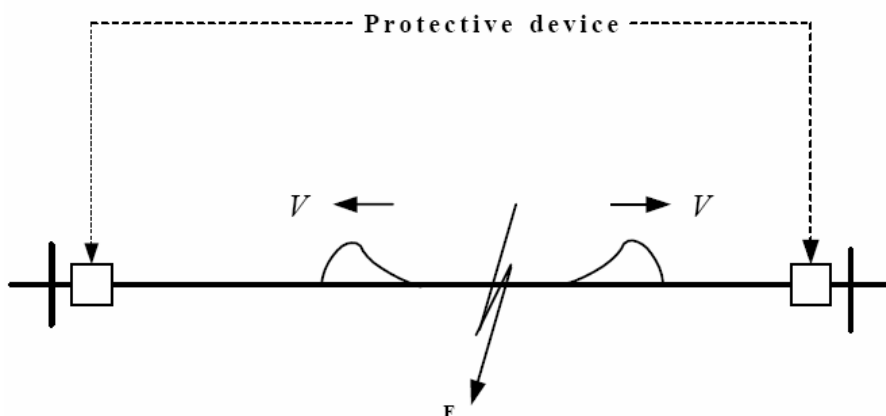
$$\frac{v^+}{i^+} = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.23)$$

และจากสมการที่ 2.21 และ 2.22 จะได้

$$\frac{v^-}{i^-} = -\sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.24)$$

ถ้าสมมติให้กระแสทิศทางบวกของ i^- อยู่ในทิศทาง การเคลื่อนที่ของคลื่นเดินทางถอยหลัง (back-ward) แล้วเครื่องหมายลบจะเปลี่ยนเป็นเครื่องหมายบวกในสมการที่ 2.22 และ 2.24 เพื่อเลือกที่จะรักษาทิศทางตำแหน่ง x ให้เป็นกระแสบวกทั้งคลื่นที่เคลื่อนไปข้างหน้า (Forward moving wave) และคลื่นที่ถอยหลัง (Backward moving wave)

อัตราส่วนของ v^+ และ i^+ เราเรียกว่า อิมพีแดนซ์ลักษณะของสายส่ง (Characteristic Impedance : Z_c) เมื่อ R และ G มีค่าเป็นศูนย์ จากหลักการของคลื่นเดินทางนี้สามารถนำมาใช้ในการอธิบายลักษณะของสัญญาณฟอลต์ได้ดังนี้ คือ เมื่อเกิดฟอลต์ขึ้น ณ จุดใด ๆ บนสายส่งจะมีสัญญาณฟอลต์เดินทางจากจุดที่เกิดฟอลต์ไปยังปลายทั้ง 2 ด้านของสายส่งด้วยความเร็วซึ่งถูกกำหนดด้วยสมการที่ 2.17 ซึ่งสามารถนำปรากฏการณ์นี้มาใช้ประโยชน์กับหลักการของอุปกรณ์ป้องกันสายส่งโดยเฉพาะส่วนที่ทำการวิเคราะห์สัญญาณ



รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะของคลื่นเดินทางในสภาวะที่เกิดฟอลต์บนสายส่ง

จากรูปแบบของการวิเคราะห์สัญญาณบนพื้นฐานของรีเลย์ป้องกันแบบเดิมนั้นพบว่าเป็นการวิเคราะห์เพื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณองค์ประกอบความถี่พื้นฐานมาใช้งานเป็นหลัก รวมถึงการนำระบบสื่อสารเข้ามาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและความเร็วในการตอบสนองของการวิเคราะห์ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาสัญญาณพอลต์พบว่านอกจากจะมีการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่พื้นฐานแล้วยังมีการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่ที่สูงกว่ารวมอยู่และยังให้ข้อมูลที่สำคัญเกี่ยวกับพอลต์อีกด้วย ซึ่งถ้าสามารถนำการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่สูงที่เกิดขึ้นมาพิจารณาโดยอ้างอิงกับหลักการของการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่พื้นฐานก็สามารถนำข้อมูลนั้นมาใช้ประโยชน์ต่อไปได้ และจากลักษณะของสัญญาณองค์ประกอบความถี่สูงที่มีการเปลี่ยนแปลงที่รวดเร็วจึงสามารถที่จะทำให้ลดช่วงของข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ได้ โดยจะช่วยลดเวลาในการวิเคราะห์และตัดสินใจซึ่งสามารถนำไปสู่การพัฒนารีเลย์ในรูปแบบใหม่ได้ในที่สุด