

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ทฤษฎีทั่วไปของสายส่งไฟฟ้ากำลัง [1]

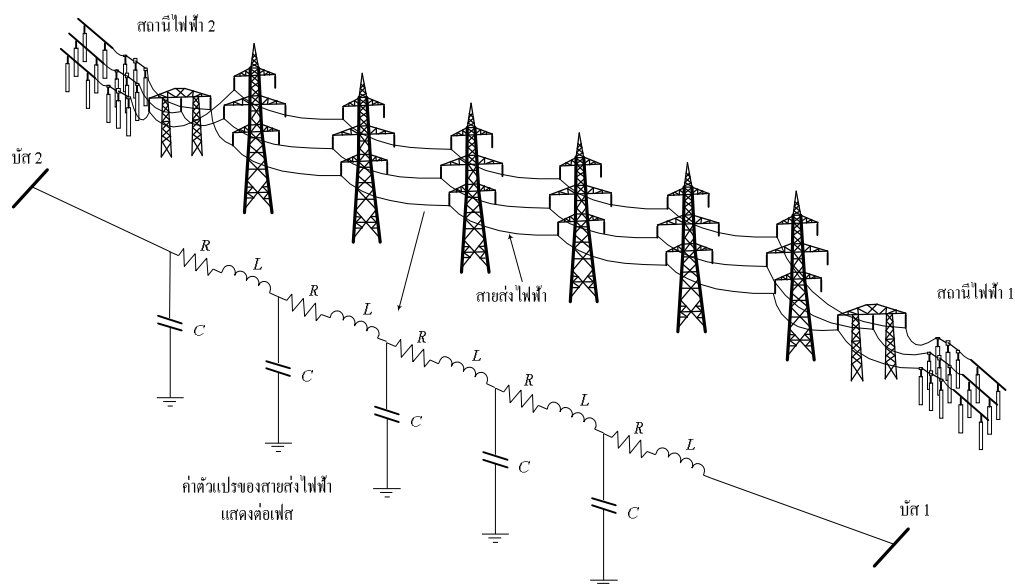
โดยทั่วไปสายส่งต่าง ๆ มักจะเชื่อมต่อกันเป็นเครือข่ายทั่วประเทศ ทำให้เราสามารถจัดสรรกำลังการผลิตในเชิงเศรษฐศาสตร์ได้อย่างเหมาะสม นอกจากนี้ยังช่วยให้สามารถถ่ายเทพลังงานไฟฟ้าในสถานะถูกเคลื่อนระหว่างพื้นที่ต่าง ๆ ได้อันเป็นส่วนช่วยให้ระบบมีความมั่นคงทางไฟฟ้าสูงขึ้นตามไปด้วย

สายส่งไฟฟ้ากำลังทุกชนิดมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าอันประกอบด้วย ความต้านทาน ความเหนี่ยวนำ ความจุไฟฟ้า และความนำไฟฟ้า โดยความต้านทานเป็นคุณสมบัติประจำตัวของสายตัวนำทั่วไปในวงจรไฟฟ้า ความเหนี่ยวนำเกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก ที่เกิดจากไฟฟ้ากระแสสลับไหลอยู่ในสายส่ง ส่วนความจุไฟฟ้าเกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าตามการเปลี่ยนแปลงแรงดันกระแสสลับในสายส่ง ซึ่งทำให้เกิดการอัดประจุและคายประจุไฟฟ้า (Charge and discharge) สำหรับความนำไฟฟ้านั้นเกิดขึ้นเนื่องจากการรั่วไหลของกระแสข้ามลูกถ้วยฉนวน แล้วทำให้เกิดการแตกตัวของประจุผ่านทางเดินในอากาศ ตามปกติกระแสรั่วจะมีค่าต่ำมากเมื่อเทียบกับกระแสที่ไหลอยู่ในสายตัวนำ ดังนั้นจึงมักถูกละเลยออกจากการคำนวณ

##### 2.1.1 สายพาดในอากาศ

การส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าในระยะไกล และผ่านตามท้องทุ่งนาที่ว่างเปล่า ผ่านเนินเขาหรือพื้นที่ว่างต่าง ๆ นั้น เรามักอาศัยสายพาดในอากาศ ซึ่งเป็นสายตัวนำเปลือย (Bare conductor) ที่ใช้อากาศเป็นฉนวน โดยเฉพาะหากต้องส่งพลังงานด้วยระบบแรงสูงมาก ๆ วิธีดังกล่าวมีค่าใช้จ่ายที่ถูกมากยิ่งขึ้น เมื่อเทียบกับการส่งด้วยสายเคเบิล สำหรับประเทศไทยขณะนี้ใช้ระบบสายพาดอากาศแรงดันสูงสุด 500 kV วงจรสายส่งโดยทั่วไปประกอบด้วยสายตัวนำ ลูกถ้วยฉนวนและลวดชิลด์ (Shield wires) โดยสายตัวนำมักจะถูกแขวนอยู่บนเสาโครงเหล็กและเสาคอนกรีต ทั้งนี้ชุดสาย

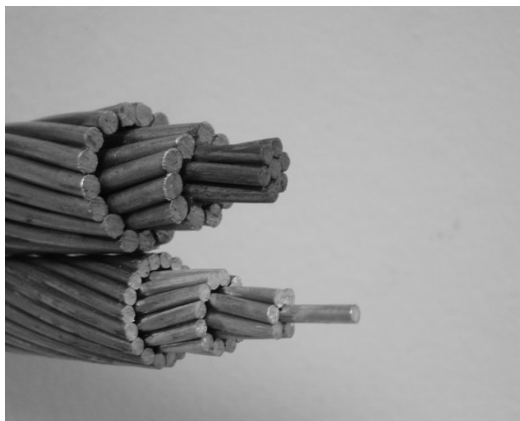
ตัวนำที่แขวนอยู่บนเสาโครงเหล็กอาจประกอบเป็นวงจรไฟฟ้าหนึ่งหรือหลายวงจรขึ้นอยู่กับกรอกแบบ



ภาพที่ 2.1 ลักษณะของสายส่งจ่ายไฟฟ้ากำลัง

### 2.1.2 ลักษณะของตัวนำสำหรับสายส่งไฟฟ้าแรงสูง

ตัวนำไฟฟ้าที่ใช้กันอยู่ทั่วไป คือ ทองแดงและอะลูมิเนียม ในอดีตนิยมใช้สายทองแดงเนื่องจากมีค่าความต้านทานน้อยกว่าอะลูมิเนียม สำหรับปัจจุบันนี้นิยมให้สายอะลูมิเนียมเนื่องจากราคาถูกและเบากว่า อย่างไรก็ตามเนื่องจากอะลูมิเนียมมีคุณสมบัติทนแรงดึงได้น้อย จึงใช้เส้นเหล็กกล้าเป็นแกนกลาง และตีเกลียวอะลูมิเนียมรอบนอก เพื่อให้สามารถทนแรงดึงได้สูงขึ้น ผลดีที่ได้จากการใช้สายอะลูมิเนียม คือ หากกำหนดให้ความยาวสายและความต้านทานเท่ากันแล้ว สายอะลูมิเนียมจะมีขนาดใหญ่กว่าสายทองแดง ดังนั้นจึงทำให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวระหว่างการใช้งานต่ำกว่า นั่นหมายความว่าระดับแรงดันเริ่มเกิดโคโรนาของสายอะลูมิเนียมจะสูงกว่า ตัวอย่างสายไฟเปลือยที่ใช้แสดงไว้ในภาพที่ 2.2



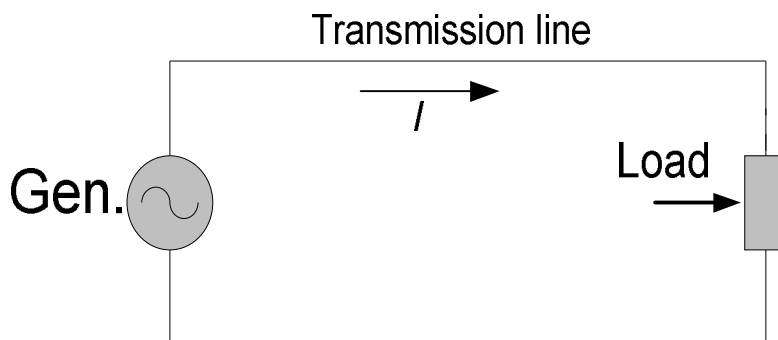
ภาพที่ 2.2 ตัวนำไฟฟ้าเปลือย แบบ ACSR

ผู้ผลิตสายไฟที่อ้างอิงตามมาตรฐานของสหรัฐอเมริกา มักกำหนดขนาดสายตีเกลียว (Stranded conductor) โดยใช้ขนาดพื้นที่หน้าตัดของสายตัวนำในหน่วย circular mils (cmil) และความยาวเป็นฟุต ส่วนตามระบบ SI (International System of Units) จะใช้ความยาวเป็นเมตรและพื้นที่หน้าตัดเป็นตารางเมตร โดย 1 circular mil (cmil หรือ CM) คือ พื้นที่ของวงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง (d) 1 mil (1 mil = 1/1000 นิ้ว) หรือ  $A \text{ (cmil)} = 4\pi[d \text{ (mils)}]^2 = 4\pi \text{ (sq.mils)}$  ทั้งนี้ 1 MCM = 1000 cmil

สำหรับที่แรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 230 kV ขึ้นไปนั้นมักนิยมใช้สายตัวนำต่อเฟสมากกว่า 1 เส้น ซึ่งรู้จักกันในชื่อของสายควบ (Bundled conductor) สายชนิดดังกล่าวจะทำงานในลักษณะที่เสมือนเป็นการเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ อันเป็นส่วนช่วยให้สามารถลดความเครียดของสนามไฟฟ้าบริเวณตัวนำได้ ส่งผลให้ลดกำลังสูญเสียอันเนื่องมาจากการเกิดปรากฏการณ์โคโรนา เสียงและคลื่นรบกวน นอกจากนี้ยังสามารถช่วยให้รีแอกแตนซ์ของสายส่งมีค่าลดลง

### 2.1.3 ลักษณะการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าผ่านสายส่งไฟฟ้ากำลัง

ลักษณะการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าผ่านสายส่งไฟฟ้ากำลัง พิจารณาตามภาพที่ 2.3 แสดงให้เห็นว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อตรงไปยังโหลดโดยตรง ดังนั้นความสามารถในการรับกำลังไฟฟ้าของโหลดนั้นจะรับเท่ากับกำลังงานที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิตออกมา



ภาพที่ 2.3 ลักษณะการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าผ่านสายส่งไฟฟ้ากำลัง

จากภาพที่ 2.3 สมมติว่าจำนวนพลังงานที่จ่ายจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้านี้จ่ายไปยังโหลดโดยตรงผ่านสายส่งไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าที่โหลดได้รับจะน้อยกว่าพลังงานที่ Generator ผลิตออกมา ดังนั้นสายส่งไฟฟ้ากำลังจะมีคุณลักษณะอย่างหนึ่งที่ทำให้พลังงานเกิดการสูญเสียระหว่างแหล่งจ่ายกับโหลด พลังงานที่สูญเสียได้เกิดขึ้น ณ จุดใดจุดหนึ่ง แต่จะเกิดตลอดความยาวของสายส่งไฟฟ้ากำลัง การสูญเสียดังกล่าวนี้กระจายออกไปโดยสม่ำเสมอตลอดสายส่งนั่นเอง สาเหตุของการสูญเสียกำลังงานไฟฟ้านี้เกิดขึ้นจากลักษณะของสายส่งไฟฟ้ากำลังนั้น เนื่องจากตัวคงที่ของสายส่งซึ่งอาจแบ่งออกได้ดังนี้ 1.ตัวคงที่ที่เป็นจุด 2.ตัวคงที่กระจาย ซึ่งตัวคงที่แบบที่ 2 นี้ เป็นลักษณะประจำตัวของสายส่งไฟฟ้ากำลัง โดยแบ่งออกเป็น 4 อย่างคือ Series Resistance , Series Inductance , Shunt Capacitance , Shunt Conductance

## 2.2 พารามิเตอร์ RLC [1]

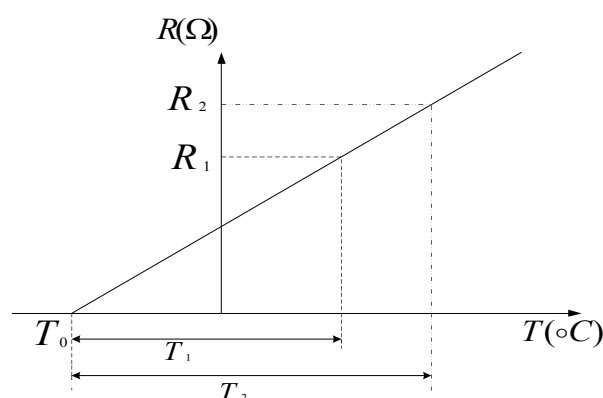
### 2.2.1 ค่าความต้านทานในสายตัวนำ

เป็นคุณสมบัติประจำตัวของสายตัวนำทั่วไปในวงจรไฟฟ้าทั่วไป ซึ่งมีความสำคัญต่อการประเมินค่าประสิทธิภาพและการศึกษาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของสายไฟฟ้าเป็นอย่างมาก เนื่องจากก่อให้เกิดกำลังสูญเสียขึ้นในสายส่งขณะทำการส่งกำลังไฟฟ้า ความต้านทานกระแสดรณ อุณหภูมิต่างๆสามารถหาได้จากสมการที่ 2.1

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2.1)$$

เมื่อ  $\rho$  = ความต้านทานจำเพาะของสายตัวนำ  
 $l$  = ความยาวของสายตัวนำ  
 $A$  = พื้นที่หน้าตัดของสายตัวนำ

องค์ประกอบที่มีผลต่อค่าความต้านทานในสายตัวนำประกอบด้วย ความถี่ การตีเกลียวของสายตัวนำ ขนาด และ อุณหภูมิของสายตัวนำ



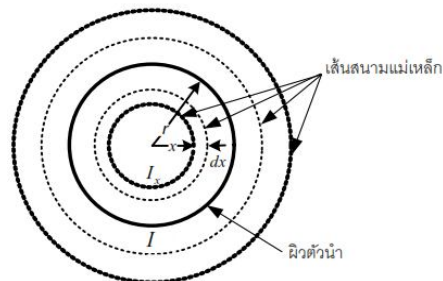
ภาพที่ 2.4 ความต้านทานของตัวนำที่แปรตามอุณหภูมิ

เมื่อมีไฟฟ้ากระแสสลับไหลในตัวนำ กระแสจะไม่กระจายตัวสม่ำเสมอทั่วทั้งพื้นที่หน้าตัดของสาย โดยความหนาแน่นของกระแสส่วนใหญ่จะอยู่บริเวณผิวของตัวนำ กรณีเช่นนี้ทำให้ค่าความต้านทานกระแสสลับมีค่าสูงกว่าความต้านทานกระแสตรง คุณสมบัติดังกล่าวรู้จักกันในชื่อของปรากฏการณ์ทางผิว (Skin Effect)

### 2.2.2 ความเหนี่ยวนำ

เกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก ที่เกิดจากไฟฟ้ากระแสสลับไหลอยู่ในสายส่ง การเปลี่ยนแปลงกระแสภายในตัวนำย่อมทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของจำนวนฟลักซ์แม่เหล็กที่คล้องตัวนำซึ่งจะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในตัวนำ ซึ่งเป็นอัตราส่วนโดยตรงกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็ก ค่าความเหนี่ยวนำเป็นคุณสมบัติของตัวนำคำนวณได้

จากได้จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแส



ภาพที่ 2.5 สนามแม่เหล็กค้ำล้อมตัวนำ

แรงดันเหนี่ยวนำในตัวนำที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กอาจเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$e = \frac{d\lambda}{dt} \quad \text{volt} \quad (2.2)$$

เมื่อ  $e$  คือ แรงดันเหนี่ยวนำในตัวนำมีหน่วยเป็น โวลต์ (Volt)

$\lambda$  คือ ฟลักซ์แม่เหล็กค้ำล้อมตัวนำมีหน่วยเป็น Wb.t (Weber – turns)

เนื่องจากฟลักซ์แม่เหล็กค้ำล้อมนี้เป็นอัตราส่วนโดยตรงกับกระแส ฉะนั้นแรงดันเหนี่ยวนำอาจเขียนอยู่ในรูปของการเปลี่ยนแปลงของกระแสได้ว่า

$$e = L \frac{di}{dt} \quad \text{volt} \quad (2.3)$$

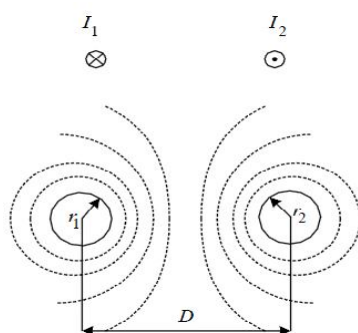
$L$  เป็นความเหนี่ยวนำของตัวนำ

$\frac{di}{dt}$  อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสมีหน่วยเป็น A/S

จากสมการทั้งสองเราอาจเขียนค่าความเหนี่ยวนำได้ว่า

$$L = \frac{d\lambda}{di} \quad H \quad (2.4)$$

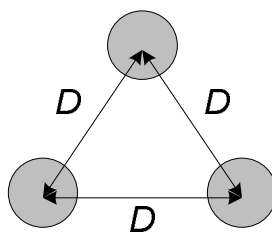
- ความเหนี่ยวนำของตัวนำแบบเฟสเดียว พิจารณาวงจรเฟสเดียวซึ่งประกอบด้วยสายไฟกลมตันขนาดความยาว 1 เมตร จำนวนสองเส้น มีรัศมีเท่ากับ  $r_1 r_2$  ดังแสดงในภาพที่ 2.6 ให้สายแรกมีกระแสไหลขนาด  $I_1$  โดยให้มีทิศทางพุ่งเข้าสู่หน้ากระดาษ ส่วนอีกเส้นหนึ่งเป็นกระแสไหลกลับ  $I_1 = -I_2$



ภาพที่ 2.6 แสดงการเหนี่ยวนำของวงจร 1 เฟส 2 สาย

- ความเหนี่ยวนำของสายส่งไฟฟ้ากำลังแบบ 3 เฟส  
 - สาย 3 เฟสแบบด้านเท่า ลักษณะของการวางสายแบบ 3 เฟส ระยะห่างระหว่างเฟสเท่ากันเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่าดังแสดงในภาพที่ 2.7 และสมมติว่า 3 เฟสสมดุล ดังนั้นกระทั่ง 3 เฟส

$$I_a + I_b + I_c = 0 \quad (2.5)$$



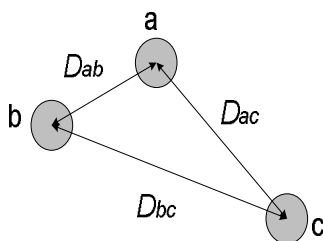
ภาพที่ 2.7 สายส่งสามเฟสที่ระยะห่างระหว่างเฟสเท่ากัน

เนื่องจากการวางตัวนำอยู่ในลักษณะสมมาตร ดังนั้น  $L_a = L_b = L_c$  ดังนั้นเราจะได้ความเหนี่ยวนำของสายต่อเฟสต่อกิโลเมตรเป็น

$$L = 0.2 \ln \frac{D}{D_s} \quad \text{mH/Km} \quad (2.6)$$

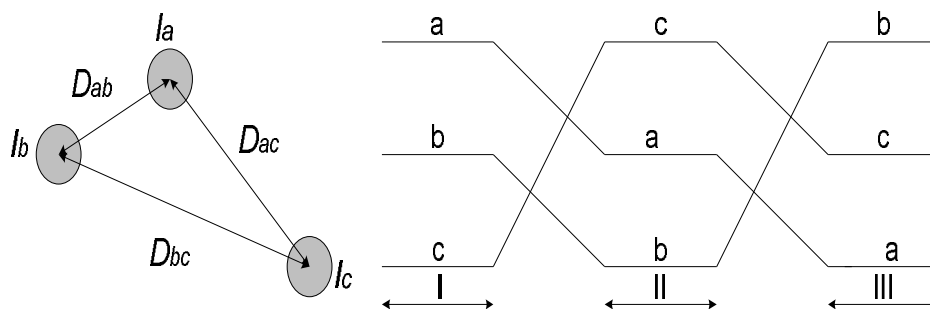
ค่า  $D_s$  คือ *GMR* คือค่าเฉลี่ยเรขาคณิตของรัศมีตัวนำ

- **สาย 3 เฟสแบบด้านไม่เท่า** การวางสายไฟสามเฟสในทางปฏิบัติโดยทั่วไปนั้น ส่วนใหญ่จะมีระยะห่างไม่เป็นด้านเท่า ตามลักษณะโครงสร้างของเสาไฟฟ้าที่ใช้กันโดยทั่วไป ดังนั้นฟลักซ์ลี้ดตัวนำและความเหนี่ยวนำของตัวนำในแต่ละเฟสจึงแตกต่างกัน ลักษณะการวางสาย 3 เฟสระยะห่างไม่เท่ากันดังแสดงในภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 สาย 3 เฟส ระยะห่างระหว่างเฟสไม่เท่ากัน

- **การสลับสาย** ตามปกติการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังนั้นต้องอาศัยแบบจำลองต่อเฟสของสายส่ง ซึ่งในกรณีที่ต้องการให้ระบบส่งมีความสมดุลนั้น วิธีการที่ใช้ได้ดีคือการสลับสายเป็นช่วง ๆ ดังแสดงในภาพที่ 2.9 ซึ่งมีการสลับเฟสทุกๆ ระยะหนึ่งในสามของความยาวรวมของสายส่ง จนครบรอบตามลำดับ การทำในลักษณะเช่นนี้ ส่งผลให้ความเหนี่ยวนำในแต่ละเฟสมีค่าเฉลี่ยเท่า ๆ กัน



ภาพที่ 2.9 การสลับสายของสายส่ง 3 เฟส



ดังนั้น เราสามารถหาค่าความเหนี่ยวนำต่อเฟสต่อกิโลเมตรของสายส่งเป็น

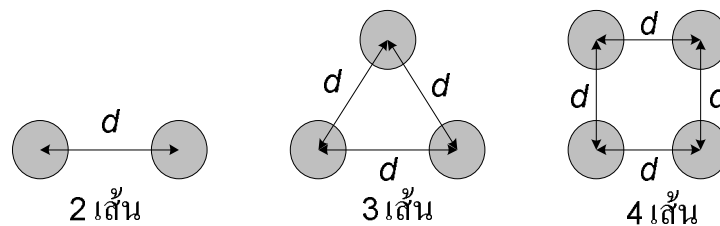
$$L = 0.2 \ln \frac{GMD}{D_S} \quad \text{mH/Km} \quad (2.7)$$

$$GMD = \sqrt[3]{D_{ab}D_{bc}D_{ac}} \quad (2.8)$$

$GMD$  คือเฉลี่ยเรขาคณิตของระยะห่างระหว่างสายเฟส

$D_S$  คือค่าเฉลี่ยเรขาคณิตของรัศมีตัวนำ

- **ค่า GMR ของสายควบ** ในกรณีระบบสายส่งแรงดันสูงตั้งแต่ 230 kV ขึ้นไปนั้น หากใช้สายไฟเส้นเดียวซึ่งมีขนาดเล็กหรือ รัศมีต่ำในแต่ละเฟสนั้น อาจจะทำให้ความเครียดของสนามไฟฟ้าตามผิวของตัวนำมีค่าสูง จนส่งผลทำให้เกิดโคโรนาขึ้น เป็นผลให้เกิดพลังงานสูญเสีย และเกิดการรบกวนต่อระบบสื่อสาร ดังนั้นเพื่อที่จะลดความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ผิวของสายไฟในระบบแรงดันสูง เราจึงใช้ตัวนำหลาย ๆ สายมาจับควบขนานกันในแต่ละเฟส ระยะห่างระหว่างสายควบเหล่านี้ไม่มากนักเมื่อเทียบกับระยะห่างระหว่างเฟส สายไฟที่มีลักษณะดังกล่าวนี้เรียกว่า สายควบ ซึ่งสายควบนี้จะประกอบด้วยตัวนำย่อย 2, 3 หรือ 4 เส้น และวางอยู่ในลักษณะดังในภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 ลักษณะสายควบแบบต่างๆ

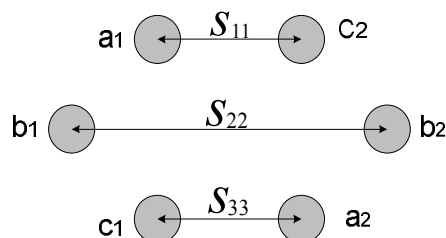
ผลดีจากการใช้สายควบ คือ ทำให้รีแอกแตนซ์ลดลง อันเนื่องมาจากระยะ  $GMR$  หรือของสายควบมีค่าเพิ่มขึ้น การคำนวณ  $GMR$  ก็เหมือนกับการหา  $D_S$  ของสายเดี่ยว (  $D_S$  เป็นระยะ  $GMR$  ) ของสายเดี่ยวซึ่งคำนวณได้ดังนี้

$$\text{สายควบ 2 สาย } GMR = \sqrt{D_S \times d} \quad (2.9)$$

$$\text{สายควบ 3 สาย } GMR = \sqrt[3]{D_S \times d^2} \quad (2.10)$$

$$\text{สายควบ 4 สาย } GMR = 1.09\sqrt[4]{D_S \times d^2} \quad (2.11)$$

- ค่าความเหนี่ยวนำของวงจรขนานแบบ 3 เฟส การก่อสร้างระบบส่งไฟฟ้าในปัจจุบันมักประสบกับปัญหาในการหาพื้นที่เพื่อก่อสร้างเสา และพาดสายไฟฟ้า ดังนั้นจึงมักจำเป็นต้องใช้พื้นที่ดังกล่าวให้คุ้มค่าที่สุด ด้วยการสร้างวงจรขนานตั้งแต่สองวงจรขึ้นไป ซึ่งในกรณีนี้ส่งผลให้การส่งกำลังไฟฟ้าในลักษณะวงจรขนานดังกล่าวมีความเชื่อถือได้สูงขึ้นอีกด้วย หากเราพิจารณาวงจรขนานของระบบส่งสามเฟสจำนวนสองวงจร ซึ่งประกอบด้วยเฟส  $a_1, b_1, c_1$  สำหรับวงจรแรก และเฟส  $a_2, b_2, c_2$  สำหรับวงจรที่สอง หากการจัดเรียงสายตัวนำของวงจรทั้งสองไม่เหมาะสมจะทำให้ค่าความเหนี่ยวนำในแต่ละเฟสของวงจรไม่สมดุล ดังนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าว จึงมักต้องทำการสลับสายตัวนำประจำเฟสต่าง ๆ ในวงจรเดียวกัน โดยเทียบกับวงจรคู่ขนานของตนเอง ด้วยดังแสดงตัวอย่างการจัดเรียงเฟสตามลำดับ  $a_1, b_1, c_1$  เทียบกับ  $a_2, b_2, c_2$  ดังแสดงในภาพที่ 2.11



ภาพที่ 2.11 วงจรขนาน 3 เฟส 1 ตัวนำ

เราสามารถใช่วิธีการคำนวณค่า  $GMD$  เพื่อหาค่าความเหนี่ยวนำต่อเฟส โดยพิจารณาเสมือนหนึ่งรวมกลุ่มของเฟสเดียวกันเข้าด้วยกัน และสามารถคำนวณค่า  $GMD$  ระหว่างเฟสได้ดังนี้

$$D_{AB} = \sqrt[4]{D_{a_1b_1}D_{a_1b_2}D_{a_2b_1}D_{a_2b_2}} \quad (2.12)$$

$$D_{BC} = \sqrt[4]{D_{b_1c_1}D_{b_1c_2}D_{b_2c_1}D_{b_2c_2}} \quad (2.13)$$

$$D_{AC} = \sqrt[4]{D_{a_1c_1}D_{a_1c_2}D_{a_2c_1}D_{a_2c_2}} \quad (2.14)$$

$$GMD = \sqrt[3]{D_{AB}D_{BC}D_{AC}} \quad (2.15)$$

$$D_{SA} = \sqrt{D_s'' D_{a1a2}} \quad (2.16)$$

$$D_{SB} = \sqrt{D_s'' D_{b1b2}} \quad (2.17)$$

$$D_{SC} = \sqrt{D_s'' D_{c1c2}} \quad (2.18)$$

ค่า  $D_s''$  คือค่าเฉลี่ยเรขาคณิตของรัศมี ( $GMR$ ) ของสายไฟกลมตันของสายควบ หรือได้จากรายคุณสมบัติของสายส่งไฟฟ้ากำลัง ตามตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ตารางคุณลักษณะและชนิดตัวนำเปลือยแบบ ACSR

Electrical characteristics of bare aluminum conductors steel-reinforced (ACSR)\*

Code word	Aluminum area, cmil	Stranding Al/St	Layers of aluminum	Outside diameter, in	Resistance			GMR $D_s$ ft	Reactance per conductor 1-ft spacing, 60 Hz	
					Dc, 20°C, $\Omega/1,000ft$	20°C, $\Omega/mi$	50°C, $\Omega/mi$		Inductive $X_{gr}$ , $\Omega/mi$	Capacitive $X'_{gr}$ , $M\Omega/mi$
Waxwing	266,800	18/1	2	0.609	0.0646	0.3488	0.3831	0.0198	0.476	0.1090
Partridge	266,800	26/7	2	0.642	0.0640	0.3452	0.3792	0.0217	0.465	0.1074
Ostrich	300,000	26/7	2	0.680	0.0569	0.3070	0.3372	0.0229	0.458	0.1057
Merlin	336,400	18/1	2	0.684	0.0512	0.2767	0.3037	0.0222	0.462	0.1055
Linnet	336,400	26/7	2	0.721	0.0507	0.2737	0.3006	0.0243	0.451	0.1040
Oriole	336,400	30/7	2	0.741	0.0504	0.2719	0.2987	0.0255	0.445	0.1032
Chickadee	397,500	18/1	2	0.743	0.0433	0.2342	0.2572	0.0241	0.452	0.1031
Ibis	397,500	26/7	2	0.783	0.0430	0.2323	0.2551	0.0264	0.441	0.1015
Pelican	477,000	18/1	2	0.814	0.0361	0.1957	0.2148	0.0264	0.441	0.1004
Flicker	477,000	24/7	2	0.846	0.0359	0.1943	0.2134	0.0284	0.432	0.0992
Hawk	477,000	26/7	2	0.858	0.0357	0.1931	0.2120	0.0289	0.430	0.0988
Hen	477,000	30/7	2	0.883	0.0355	0.1919	0.2107	0.0304	0.424	0.0980
Osprey	556,500	18/1	2	0.879	0.0309	0.1679	0.1843	0.0284	0.432	0.0981
Parakeet	556,500	24/7	2	0.914	0.0308	0.1669	0.1832	0.0306	0.423	0.0969
Dove	556,500	26/7	2	0.927	0.0307	0.1663	0.1826	0.0314	0.420	0.0965
Rook	636,000	24/7	2	0.977	0.0269	0.1461	0.1603	0.0327	0.415	0.0950
Grosbeak	636,000	26/7	2	0.990	0.0268	0.1454	0.1596	0.0335	0.412	0.0946
Drake	795,000	26/7	2	1.108	0.0215	0.1172	0.1284	0.0373	0.399	0.0912
Tern	795,000	45/7	3	1.063	0.0217	0.1188	0.1302	0.0352	0.406	0.0925
Rail	954,000	45/7	3	1.165	0.0181	0.0997	0.1092	0.0386	0.395	0.0897
Cardinal	954,000	54/7	3	1.196	0.0180	0.0988	0.1082	0.0402	0.390	0.0800
Ortolan	1,033,500	45/7	3	1.213	0.0167	0.0924	0.1011	0.0402	0.390	0.0885
Bluejay	1,113,000	45/7	3	1.259	0.0155	0.0861	0.0941	0.0415	0.386	0.0874
Finch	1,113,000	54/19	3	1.293	0.0155	0.0856	0.0937	0.0436	0.380	0.0866
Bittern	1,272,000	45/7	3	1.345	0.0136	0.0762	0.0832	0.0444	0.378	0.0855
Pheasant	1,272,000	54/19	3	1.382	0.0135	0.0751	0.0821	0.0466	0.372	0.0847
Bobolink	1,431,000	45/7	3	1.427	0.0121	0.0684	0.0746	0.0470	0.371	0.0837
Plover	1,431,000	54/19	3	1.465	0.0120	0.0673	0.0735	0.0494	0.365	0.0829
Lapwing	1,590,000	45/7	3	1.502	0.0109	0.0623	0.0678	0.0498	0.364	0.0822
Falcon	1,590,000	54/19	3	1.545	0.0108	0.0612	0.0667	0.0523	0.358	0.0814
Bluebird	2,156,000	84/19	4	1.762	0.0080	0.0476	0.0515	0.0586	0.344	0.0776

\* Most used multilayer sizes.

\*\* Data, by permission, from Aluminum Association, *Aluminum Electrical Conductor Handbook*, 2<sup>nd</sup> ed., Washington, D.C., 1982.

ดังนั้นค่าเฉลี่ยเรขาคณิตของรัศมีที่ใช้ในการคำนวณค่าความเหนี่ยวนำต่อเฟสเมื่อเทียบกับสายนิวทรัล เป็น

$$GMR_L = \sqrt[3]{D_{SA}D_{SB}D_{SC}} \quad (2.19)$$

$GMR_L$  คือ ค่าเฉลี่ยทางเรขาคณิตของรัศมีตัวนำ

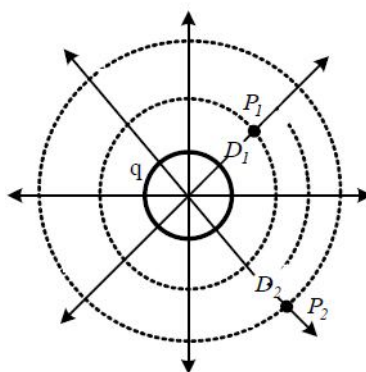
และสามารถคำนวณค่าเหนี่ยวนำต่อเฟสต่อกิโลเมตร เป็น

$$L = 0.2 \ln \frac{GMD}{GMR_L} \quad \text{mH/Km} \quad (2.20)$$

### 2.2.3 ความจุไฟฟ้าของสายส่งไฟฟ้ากำลัง

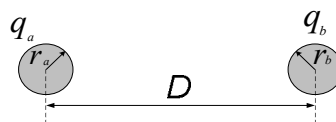
เมื่อมีความต่างศักย์ระหว่างโลหะสองชิ้นซึ่งกันด้วยฉนวนยอมมีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นและมีคุณสมบัติในการเก็บประจุซึ่งเรียกว่า ความจุไฟฟ้า ดังนั้นในระบบสายส่งไฟฟ้ากำลังซึ่งมีความต่างศักย์ระหว่างสายไฟจะมีสนามไฟฟ้าระหว่างสายไฟเกิดขึ้นซึ่งทำให้เกิดคุณสมบัติของความจุไฟฟ้าขึ้น ทั้งนี้สนามไฟฟ้าจะมีทิศทางพุ่งออกจากประจุบวกไปที่ประจุลบบนสายไฟ จำนวนเส้นสนามไฟฟ้าที่พุ่งออกมาจากสายไฟจะเท่ากับจำนวน คูลอมป์ของประจุที่มีอยู่บนตัวนำซึ่งหมายความว่าความหนาแน่นของเส้นสนามไฟฟ้าต่อตารางเมตรแสดงถึง จำนวนประจุไฟฟ้าในหน่วยคูลอมป์ต่อหนึ่งตารางเมตรนั่นเอง ขนาดของความจุไฟฟ้าระหว่างสายตัวนำจะขึ้นอยู่กับขนาดของตัวนำ ระยะระหว่างตัวนำ และระดับความสูงของสายเหนือพื้นดิน ตามความสัมพันธ์ปกตินั้น ความจุไฟฟ้า  $C$  จะเป็นค่าสัดส่วนระหว่างประจุไฟฟ้า  $q$  และความต่างศักย์  $V$  ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ 2.21

$$C = \frac{q}{V} \quad \text{culomp} \quad (2.21)$$



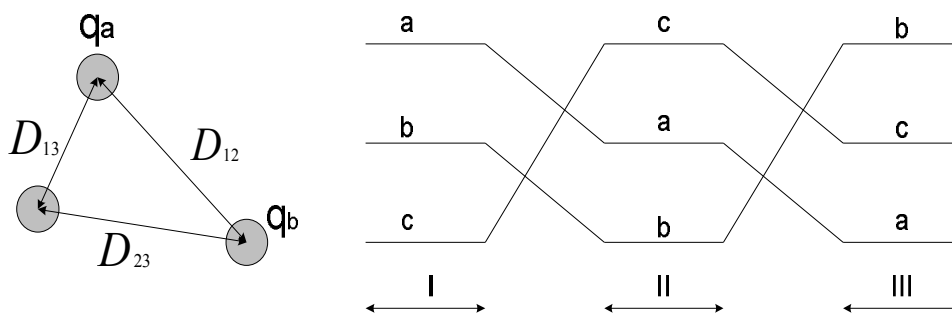
ภาพที่ 2.12 ลักษณะการกระจายของสนามไฟฟ้ารอบตัวนำ

- ความจุไฟฟ้าของสายเฟสเดียว หากเราพิจารณาสายส่งหนึ่งเฟสยาว 1 เมตร ที่ประกอบด้วยตัวนำสองเส้นรัศมี  $r_a$  และ  $r_b$  ดังแสดงในภาพที่ 2.13 ตัวนำแต่ละเส้นวางห่างกัน  $D$  เมตร หากเรากำหนดให้ตัวนำ  $a$  มีประจุ  $q_a$  คูლობป์ ส่วนตัวนำมีประจุ  $q_b$  คูლობป์ ผลจากการมีประจุไฟฟ้าของตัวนำ  $b$  และพื้นดินจะส่งผลทำให้เกิดการรบกวนต่อสนามไฟฟ้าของตัวนำ  $a$  ดังนั้น เราจึงสมมติว่าประจุมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอตลอดพื้นผิวตัวนำส่งผลให้ทั่วทั้งพื้นผิวตัวนำเปรียบเสมือนมีศักย์ไฟฟ้าเท่ากันตลอด (Equipotential surface)



ภาพที่ 2.13 ลักษณะการวางของตัวนำหนึ่งเฟส 2 สาย

- ความจุไฟฟ้าของสายส่ง 3 เฟส เมื่อพิจารณาสายส่งไฟฟ้ากำลังแบบ 3 เฟส ที่มีตัวนำ 3 เส้น แต่ละเส้นมีรัศมี  $r$  และมีระยะห่างระหว่างตัวนำดังแสดงในภาพที่ 2.14



ภาพที่ 2.14 การสลับสายในระบบ 3 เฟส

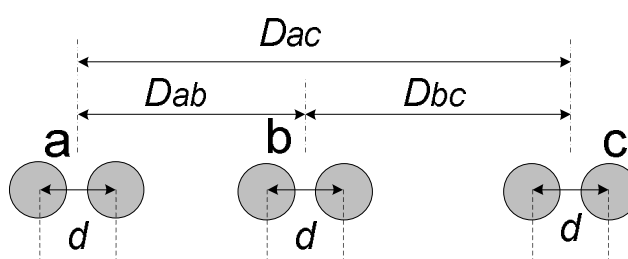
ดังนั้นสมการในการหาค่าความจุไฟฟ้าต่อเฟสเทียบกับ นิพจน์เป็น

$$C = \frac{q_a}{V_{an}} = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln(GMD/r)} \text{ F/m} \quad (2.22)$$

และค่าความจุไฟฟ้าในหน่วย  $\mu\text{F}$  ต่อกิโลเมตร เป็น

$$C = \frac{0.0556}{\ln(GMD/r)} \quad \mu\text{F}/\text{km} \quad (2.23)$$

- ความจุไฟฟ้าของสายควบ การคำนวณหาค่าความจุไฟฟ้าของระบบสามเฟสแบบสายควบนั้นสามารถกระทำได้ในทำนองเดียวกับสายธรรมดา โดยพิจารณาตามภาพที่ 2.15



ภาพที่ 2.15 ระบบส่ง 3 เฟสแบบสายควบ 2 เส้น

ดังนั้น เราสามารถคำนวณหาความจุไฟฟ้าระหว่างสายกับนิวทรัลเป็น

$$C = \frac{0.0556}{\ln(GMD/r^b)} \quad \mu\text{F}/\text{Km.} \quad (2.24)$$

โดย  $r^b$  มีความหมายคล้ายคลึงกับ  $GMR$  ที่ใช้ในการคำนวณความเหนี่ยวนำไฟฟ้า เพียงแต่ในการคำนวณความจุไฟฟ้า เราจะใช้ค่ารัศมีจริง ( $r$ ) แทนที่จะเป็นรัศมีเสมือน ( $D_s$ ) หากกำหนดให้  $d$  คือ ระยะห่างระหว่างสายแต่ละเส้นของสายควบ เราจะได้ความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$\text{สายควบแบบ 2 เส้น} \quad r^b = \sqrt{rd} \quad (2.25)$$

$$\text{สายควบแบบ 3 เส้น} \quad r^b = \sqrt[3]{rd^2} \quad (2.26)$$

$$\text{สายควบแบบ 4 เส้น} \quad r^b = 1.09\sqrt[4]{rd^3} \quad (2.27)$$

- ความจุไฟฟ้าของสายขนานแบบ 3 เฟส เราสามารถหาค่าความจุไฟฟ้าโดยมีการจัดเรียงตำแหน่งเฟสโดยพิจารณาจากภาพที่ 2.11 ดังนั้นสมการในการหาค่าความจุไฟฟ้าของวงจรรขนานแบบ 3 เฟสเทียบกับนิวทริลเป็น

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln(GMD/GMR_C)} \quad \text{F/m} \quad (2.28)$$

และสามารถคำนวณหาความจุไฟฟ้าของสายขนาน 3 เฟสเทียบกับนิวทริลต่อกิโลเมตรเป็น

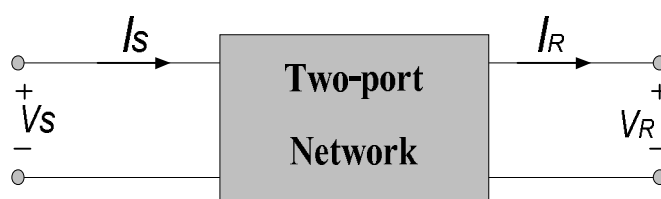
$$C = \frac{0.0556}{\ln(GMD/GMR_C)} \quad \mu\text{F/Km} \quad (2.29)$$

$$GMR_C = \sqrt[2]{r_a r_b r_c} \quad (2.30)$$

$GMR_C$  คือ ค่ารัศมีเฉลี่ยทางเรขาคณิตของความจุไฟฟ้า

## 2.3 สมรรถนะของสายส่งไฟฟ้า [1]

ในหัวข้อนี้จะเป็นการกล่าวถึงสมรรถนะของสายส่งไฟฟ้ากำลัง ซึ่งเสนอหลังการคำนวณพารามิเตอร์  $A B C D$  ซึ่งเป็นค่าคงที่ที่ใช้ในการคำนวณสมรรถนะของสายส่งไฟฟ้ากำลัง หลักการพื้นฐานในการวิเคราะห์สมรรถนะของสายส่งไฟฟ้ากำลัง จะอาศัยวงจรสมมูลที่เรียกกันว่าวงจรสองทางเข้าออก หรือ (Two-port Network) ดังแสดงในภาพที่ 2.16 โดยที่  $V_s, I_s$  เป็นแรงดันและกระแสทางด้านเข้า ส่วน  $V_R, I_R$  เป็นแรงดันและกระแสทางด้านออก



ภาพที่ 2.16 วงจรสองทางเข้าออก (Two port Network.)

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทางขาเข้าและปริมาณทางขาออกสามารถแสดงเป็น

$$\mathbf{V}_s = \mathbf{A}\mathbf{V}_R + \mathbf{B}\mathbf{I}_R \quad \text{Volt} \quad (2.31)$$

$$\mathbf{I}_s = \mathbf{C}\mathbf{V}_R + \mathbf{D}\mathbf{I}_R \quad \text{Amp} \quad (2.32)$$

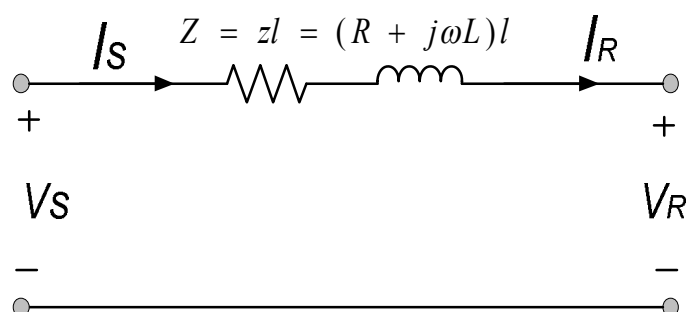
หรือจะเขียนในรูปเมตริกซ์เป็น

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}_s \\ \mathbf{I}_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{C} & \mathbf{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_R \\ \mathbf{I}_R \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

โดย  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{C}$  และ  $\mathbf{D}$  เป็นตัวแปรที่ขึ้นอยู่กับค่าคงที่  $R$ ,  $L$ ,  $C$  และ  $G$  ของสายส่ง และเป็นจำนวนเชิงซ้อน โดย  $\mathbf{A}$  และ  $\mathbf{D}$  ไม่มีหน่วย ส่วน  $\mathbf{B}$  มีหน่วยเป็นโอห์ม และ  $\mathbf{C}$  มีหน่วยเป็นซีเมนส์

### 2.3.1 สายส่งไฟฟ้ากำลังระยะสั้น

สายส่งไฟฟ้ากำลังระยะสั้น หมายถึงสายตัวนำเปลือยที่ผาดอยู่ในอากาศ ซึ่งมีระยะทางไม่เกิน 80 Km หรือแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่า 69 kV โดยทั่วไปสายประเภทนี้จะมีผลจากตัวเก็บประจุต่ำมาก ดังนั้นแบบจำลองของสายส่งจึงประกอบด้วยความต้านทานต่ออนุกรมอยู่กับความเหนี่ยวนำเท่านั้นดังแสดงในภาพที่ 3.17 วงจรดังกล่าวเป็นวงจรสมมูลต่อเฟสและสามารถใช้แทนสายส่งสามเฟสสมมูลก็ได้ โดยมี  $Z$  เป็นอิมพีแดนซ์รวมของสายส่งแต่ละเส้น ส่วน  $\mathbf{V}_s$  และ  $\mathbf{V}_R$  เป็นแรงดันเฟส  $\mathbf{I}_s$  และ  $\mathbf{I}_R$  เป็นกระแสในสายตามลำดับ



ภาพที่ 2.17 วงจรสมมูลของสายส่งระยะสั้น



ในการวิเคราะห์เราจะอาศัยวงจรตามภาพที่ 3.17 โดยอาศัยค่าอิมพีแดนซ์ต่อหน่วยความยาว แทนอิมพีแดนซ์อนุกรมรวมของสายตัวนำโดยอาศัยสัญลักษณ์ดังนี้

$z = r + j\omega L$   $\Omega/m$ . คือค่าอิมพีแดนซ์อนุกรมต่อหน่วยความยาว

$y = g + j\omega C$   $S/m$ . คือแอดมิตแตนซ์ขนานต่อหน่วยความยาว

$Z = z l$   $\Omega$  คือค่าอิมพีแดนซ์อนุกรมทั้งหมด

$Y = y l$   $S$ . คือค่าแอดมิตแตนซ์ขนานทั้งหมด

$l$  คือความยาวของสายส่งไฟฟ้ากำลัง

ตัวแปร **A**, **B**, **C** และ **D** สำหรับสายส่งระยะสั้นในภาพที่ 3.17 นั้นสามารถคำนวณได้โดยอาศัยสมการกระแสและสมการแรงดันตามกฎเคอร์ชอฟท์ (Kirchhoff's laws) ได้ดังนี้

$$V_s = V_R + Z I_R \quad (2.34)$$

$$I_s = I_R \quad (2.35)$$

หรืออาจจะเขียนในรูปเมตริกซ์ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} V_s \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

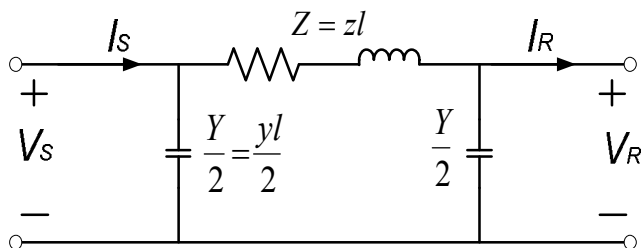
ดังนั้น ตัวแปร **A B C D** มีค่าเป็น

$$A = D = 1 \text{ per Unit ; } B = Z \ \Omega ; C = 0 \text{ S.} \quad (2.37)$$

### 2.3.2 สายส่งไฟฟ้ากำลังระยะปานกลาง

สายส่งไฟฟ้าระยะปานกลางนี้โดยทั่วไปจะมีความยาวอยู่ที่ 80 ถึง 250 กิโลเมตร สายส่งประเภทนี้จะคิดค่าความจุไฟฟ้าต่อขนานเพื่อความถูกต้อง โดยจะมีการแบ่งครึ่งความจุไฟฟ้ารวมทั้งหมดของสายส่งไฟฟ้ากำลัง จากนั้นทำการเอาความจุไฟฟ้าที่แบ่งครึ่งแล้ว เอาไปต่อไว้ที่

ปลายทางและต้นทางของสายส่งไฟฟ้ากำลัง ลักษณะดังกล่าวเป็นการต่อคล้ายๆกับรูปตัว  $\pi$  เราจึงมักเรียกวจรสมมูลของสายส่งไฟฟ้ากำลังระยะปานกลางนี้ว่า วงจรสมมูลแบบ  $\pi$  ดังภาพที่ 3.18



ภาพที่ 2.18 วงจรสมมูลของสายส่งระยะปานกลาง (วงจรแบบ  $\pi$ )

ในภาพที่ 3.18 ค่า  $Z$  คือค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งไฟฟ้ากำลัง ส่วนค่า  $Y$  คือค่าแอดมิตแตนซ์ขนานรวมของสายส่งไฟฟ้ากำลัง ซึ่งค่า  $Y$  เขียนความสัมพันธ์เป็น

$$Y = (g + j\omega c)l \quad (2.38)$$

ค่า  $g$  คือค่าความนำไฟฟ้าต่อหน่วยความยาวของสายส่งไฟฟ้ากำลัง ซึ่งในสภาวะปกติจะแสดงถึงกระแสที่รั่วข้ามฉนวนลูกถ้วยและฉนวนต่างๆ ตลอดจนค่าที่เกิดจากปรากฏการณ์โคโรร่า นั้นจะมีค่าต่ำมาก ดังนั้นเราจึงมักละเลยออกจากกรคำนวณ ส่วนค่า  $C$  เป็นค่าความจุไฟฟ้าเทียบ กับนิวทริลต่อหน่วยความยาว ดังนั้น เขียนความสัมพันธ์ในรูปของเมตริกซ์ เป็น

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1 + YZ/2) & (Z) \\ Y(1 + YZ/4) & (1 + YZ/2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์ของ  $A$   $B$   $C$  และ  $D$  เป็น

$$\mathbf{A} = \mathbf{D} = \mathbf{1} + \frac{\mathbf{YZ}}{2} \quad \text{p.u} \quad (2.41)$$

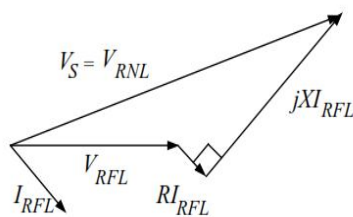
$$\mathbf{B} = \mathbf{Z} \quad \Omega \quad (2.42)$$

$$\mathbf{C} = \mathbf{Y} \left( \mathbf{1} + \frac{\mathbf{YZ}}{4} \right) \quad \text{S.} \quad (2.43)$$

เราสามารถใช้อัตราแปร **ABC** และ **D** ประกอบการอธิบายการคุมค่าแรงดัน (Voltage-Regulation: VR) ซึ่งแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่ทางฝั่งเข้าและขาออกของสายส่งเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงจากสภาวะไม่มีโหลด (no-load) ไปสู่สภาวะที่มีโหลดเต็มที่ ณ ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าคงที่ค่าหนึ่งโดยทำการคุมค่าแรงดันทางฝั่งขาเข้าให้คงที่ การคุมค่าแรงดันมักแสดงในรูปเปอร์เซ็นต์ของแรงดันโหลดเต็มที่ดังนี้

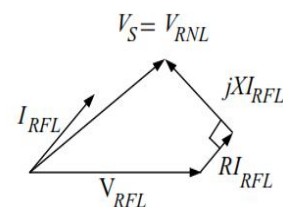
$$\%VR = \left| \frac{V_{RNL} - V_{RFL}}{V_{RFL}} \right| \times 100 \quad (2.44)$$

โดยที่ VR เป็นการควบคุมค่าแรงดันมีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ ส่วน  $|V_{RNL}|$  เป็นขนาดของแรงดันขาออกในสภาวะไม่มีโหลด และ  $|V_{RFL}|$  เป็นขนาดของแรงดันขาออกในสภาวะที่มีโหลดเต็มที่



(ก) แผนภาพเฟสเซอร์ของสายส่งระยะสั้น

(กระแสดำหลังแรงดัน)



(ข) แผนภาพเฟสเซอร์ของสายส่งระยะสั้น

(กระแสนำหน้าแรงดัน)

ภาพที่ 2.19 แผนภาพเฟสเซอร์ของสายส่งไฟฟ้ากำลัง

ผลของตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของโหลดต่อการคุมค่าแรงดัน ซึ่งแสดงในรูปของแผนภาพเฟสเซอร์ สำหรับสายส่งระยะสั้นได้นำแสดงไว้ในภาพที่ 2.19 นั้นเป็นการแสดงถึง

ความสัมพันธ์ในกรณีที่โหลดมีค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าแบบตามหลังและนำหน้า ณ สภาวะโหลดเต็มที่

สำหรับสายส่งระยะสั้น จากสมการที่ 5.5 เราจะพบว่าในสภาวะไม่มีโหลด ( $I_{RNL} = 0$ ) นั้นจะส่งผลให้  $V_S = V_{RLR}$  ดังนั้นเราจะพิจารณาในกรณีโหลดมีค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าแบบตามหลังจากภาพที่ 2.19 ได้ว่า  $V_{RNL}$  จะมีค่าสูงกว่า  $V_{RFL}$  มาก ผลดังกล่าวทำให้การควบคุมแรงดันมีค่าสูงซึ่งแสดงว่าระบบไม่สามารถควบคุมแรงดันได้ดีนัก ในกรณีที่โหลดมีค่าตัวประกอบกำลังแบบนำหน้านั้นค่า  $V_{RFL}$  อาจจะไม่ต่างจากค่า  $V_{RNL}$  มากนัก ดังนั้นการควบคุมแรงดันจึงมีค่าไม่สูงหรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง คือ ระบบสามารถควบคุมความแตกต่างระหว่างแรงดันในสภาวะมีโหลดเต็มและสภาวะไร้โหลดค่อนข้างดี

ดังนั้นแรงขณะไม่มีโหลดสามารถคำนวณได้ โดยที่  $I_{RNL} = 0$  เป็น

$$V_{RNL} = \frac{V_S}{A} \quad (2.45)$$

ในทางปฏิบัตินั้น เนื่องจากโหลดส่วนใหญ่เป็นโหลดเหนี่ยวนำ ดังนั้นแรงดันที่ปลายด้านรับของสายส่งจะมีค่าลดลงเมื่อโหลดมีค่าสูงและจะเพิ่มขึ้นเมื่อโหลดมีค่าต่ำ ระบบสายส่งแบบแรงดันสูงมาก (Extra High Voltage Line: EHV) ซึ่งตามปกติสามารถรักษาระดับแรงดันอยู่ภายในขอบเขต %5 ของแรงดันพิกัดนั้น จะทำให้ผลการควบคุมแรงดันมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 10% ซึ่งถือว่าเป็นค่าเหมาะสมในทางปฏิบัติ

นอกจากความสัมพันธ์ต่าง ๆ ดังกล่าวข้างต้น ความสามารถในการรับโหลดของสายส่ง (Line load ability) ก็ถือว่าเป็นเรื่องสำคัญ ที่เกี่ยวข้องกับขีดจำกัดของสายส่งซึ่งมีอยู่ 3 ประเภท คือ

- (1) ขีดจำกัดทางด้านอุณหภูมิ (Thermal limit)
- (2) ขีดจำกัดด้านแรงดันตก (Voltage drop limit)
- (3) ขีดจำกัดด้านเสถียรภาพในสภาวะอยู่ตัว (Steady state stability limit)

ขีดจำกัดทางด้านอุณหภูมิของสายส่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิสูงสุดของสายตัวนำซึ่งมีผลต่อการหย่อนตัวของสายระหว่างเสาโครงเหล็ก และการสูญเสียความสามารถในการรับแรงดึงเนื่องจาก

การยื่นตัวลงหลังจากได้รับความร้อน ดังนั้นหากอุณหภูมิมีค่าสูงเกินไปจะส่งผลให้สายหย่อนตัวลงมาก ทำให้ระยะห่างระหว่างสายตัวนำและพื้นดินก็อาจจะไม่เป็นไปตามที่กำหนด

นอกจากนั้นหากอุณหภูมิสูงเกินขีดจำกัดทางด้านความยืดหยุ่นของสายตัวนำก็จะส่งผลให้สายส่งไม่สามารถหดตัวเท่าขนาดเดิมหลังจากยื่นตัวลง โดยทั่วไปอุณหภูมิของสายตัวนำขึ้นอยู่กับขนาดของกระแสและระยะเวลาที่กระแสค่าดังกล่าวไหลผ่าน รวมทั้งอุณหภูมิรอบข้าง ความเร็วลมและสภาพของพื้นผิวของสายตัวนำ สำหรับสายส่งระยะสั้นนั้นความสามารถในการรับโหลดมักถูกกำหนดด้วยขีดจำกัดทางด้านอุณหภูมิของสายตัวนำ

ส่วนสายส่งระยะปานกลางนั้น ความสามารถในการรับโหลดได้มักถูกกำหนดจากขีดจำกัดของแรงดันตกในสายมากกว่าขีดจำกัดทางด้านอุณหภูมิ ในทางปฏิบัติเราอาจกำหนดให้ค่า  $V_R/V_S \geq 0.95$  เป็นเกณฑ์ที่ยอมรับได้สำหรับแรงดันตกในสายและมีความปลอดภัยในทางปฏิบัติ

## 2.4 ทฤษฎีของโปรแกรม Macromedia Flash ที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมช่วยสอน [6]

### 2.4.1 ความหมาย

Macromedia Flash 8 Professional คือ โปรแกรมที่ใช้ในการสร้างงานในรูปแบบมัลติมีเดียด้านการทำงานเกี่ยวกับภาพ เสียง ภาพเคลื่อนไหว และภาพยนตร์ได้อย่างสมบูรณ์ ที่สำคัญคือ ง่าย สะดวกรวดเร็ว และสามารถทำงานได้หลากหลาย ไม่ว่าจะเป็นเว็บไซต์ เกมส์ การนำเสนอ (presentation) หรือการเขียนโปรแกรมเพื่อตอบโต้กับผู้ใช้

### 2.4.2 ประโยชน์ของโปรแกรม Macromedia Flash 8 Professional

- ใช้ในการพรีเซนต์ชั่น (Presentation) ในการนำเสนองานหรือข้อมูลต่างๆ
- เมื่อสร้างชิ้นงานจาก Flash เสร็จสมบูรณ์แล้ว สามารถนำชิ้นงานไปเผยแพร่แบบออนไลน์บนเว็บไซต์ได้
- นำไปสร้างแบนด์เนอร์โฆษณาสินค้า ทำการ์ดอวยพรแบบออนไลน์บนเว็บไซต์สร้างภาพเคลื่อนไหวแบบตัวการ์ตูน แม้กระทั่งสร้างเป็น Flash game ได้อีกด้วย
- ใช้ในการสร้างแบบการเรียนการสอนแบบ E-learning

- สร้างแอปพลิเคชันเพื่อใช้แสดง และควบคุมการแสดงผ่านข้อมูลผ่าน ทางอินเทอร์เน็ต  
เช่นการค้นหาสินค้าผ่านเคตตาล็อก ซือปิง เป็นต้น

### 2.4.3 การใช้งาน Flash ที่สร้างเสร็จสมบูรณ์แล้ว

ไฟล์ Flash ที่สร้างเสร็จสมบูรณ์แล้วจะมีนามสกุลเป็น \*.fla (FLA) ซึ่งสามารถนำมาเล่นบนโปรแกรมมัลติมีเดียที่มีอยู่บนเครื่องคอมพิวเตอร์ทั่วไปได้ ซึ่งโปรแกรมมัลติมีเดียที่ใช้ได้ คือ โปรแกรม Flash Player โปรแกรม KM Player โปรแกรม GOM Player หรือโปรแกรมเล่นไฟล์มัลติมีเดียอื่นๆที่สามารถเล่นไฟล์นามสกุล \*.fla ได้

### 2.4.4 การเผยแพร่ชิ้นงานที่สร้าง

ซึ่งโปรแกรม Flash สามารถแปลงไฟล์งานให้เราได้หลายรูปแบบไม่ว่าจะเป็นไฟล์ SWF, HTML, GIF, JPEG, PNG, QuickTime เป็นต้น เพื่อความเหมาะสมที่จะมาแสดงผลบนคอมพิวเตอร์ทั่วไปได้

## 2.5 ทฤษฎีของ Visual Basic ที่ใช้ในการออกแบบโปรแกรมคำนวณ [6]

โปรแกรม Visual Basic เป็นโปรแกรมที่ได้เปลี่ยนรูปแบบการเขียนโปรแกรมใหม่โดยมีชุดคำสั่งมาสนับสนุนการทำงาน มีเครื่องมือ เพื่อสำหรับช่วยในการออกแบบโปรแกรมโดยเน้นการออกแบบหน้าจอแบบกราฟิก หรือที่เรียกว่า Graphic User Interface (GUI) ทำให้การจัดรูปแบบหน้าจอเป็นไปได้ง่าย และในการเขียนโปรแกรมนั้นจะเขียนแบบ Event - Driven Programming คือโปรแกรมจะทำงานก็ต่อเมื่อ ผู้ใช้เลื่อนเมาส์ ผู้ใช้คลิกปุ่มบนคีย์บอร์ดผู้ใช้คลิกปุ่มเมาส์ เป็นต้น ในการพัฒนาโปรแกรมประยุกต์ด้วย Visual Basic การเขียนโค้ดจะถูกแบ่งออกเป็นส่วนๆ เรียกว่า โพรซีเจอร์ (Procedure) แต่ละโพรซีเจอร์จะประกอบไปด้วย ชุดคำสั่งที่พิมพ์เข้าไปแล้วทำให้คอนโทรลหรือออบเจกต์นั้น ๆ ตอบสนองการกระทำของผู้ใช้ซึ่งเรียกว่าการเขียนโปรแกรมเชิงวัตถุ (Object Oriented Programming-OOP)

ซึ่งโครงการนี้ได้นำโปรแกรมมาประยุกต์ใช้เพื่อให้เป็นไปตามหลักการและสมการต่างๆ ของเรื่องคุณลักษณะสายส่งไฟฟ้ากำลัง เพื่อคำนวณหาค่าคงตัว และสมรรถนะของสายส่งไฟฟ้ากำลัง ใช้ประกอบการศึกษาและทำความเข้าใจ ซึ่งการใช้งานของโปรแกรมจะกล่าวรายละเอียดในส่วนต่อไป

### 2.5.1 วัตถุประสงค์ของการใช้โปรแกรม Microsoft Visual Basic

- เพื่อพัฒนาโปรแกรมสำหรับช่วยคำนวณในเรื่องคุณลักษณะของสายส่งไฟฟ้ากำลังกำลังโดยคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของสายส่งไฟฟ้ากำลังคือ
  - ค่าความเหนี่ยวนำ
  - ค่าความต้านทาน
  - ค่าความจุไฟฟ้า
- เพื่อให้มีความสอดคล้องกับหลักทฤษฎีเรื่องคุณลักษณะของสายส่งไฟฟ้ากำลัง
- เพื่อให้ผู้ที่สนใจศึกษาในเรื่องคุณลักษณะของสายส่งไฟฟ้ากำลังการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของสายส่งไฟฟ้ากำลังจากโปรแกรมช่วยสอนได้ง่ายสามารถเรียนรู้ได้ตลอดเวลา
- เพื่อวิเคราะห์ปัญหาและแก้ปัญหาในการพัฒนาโปรแกรมสำหรับช่วยสอนหรือช่วยในการคำนวณ

### 2.5.2 ประโยชน์ของโปรแกรม Microsoft Visual basic

- สามารถเขียน โปรแกรมได้ทั้ง Windows และ เว็บ
- ภาษาเขียน โปรแกรมที่ง่ายต่อการเริ่มเรียนรู้
- แก้ไขโปรแกรมที่เขียนได้ง่าย โดยการเขียนโปรแกรมขึ้นนั้นอาจจะมี ข้อผิดพลาดได้เสมอซึ่งการแก้ไขหรือปรับปรุงภายในหลังของ Microsoft Visual basic นั้นทำได้ง่ายโดยมี เครื่องมือชนิดต่างๆคอยช่วยเหลือ