บทที่ 3

สายส่งไฟฟ้าแรงสูง

(High Voltage Transmission Line)

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อานนท์ อิศรมงคลรักษ์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

ระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง

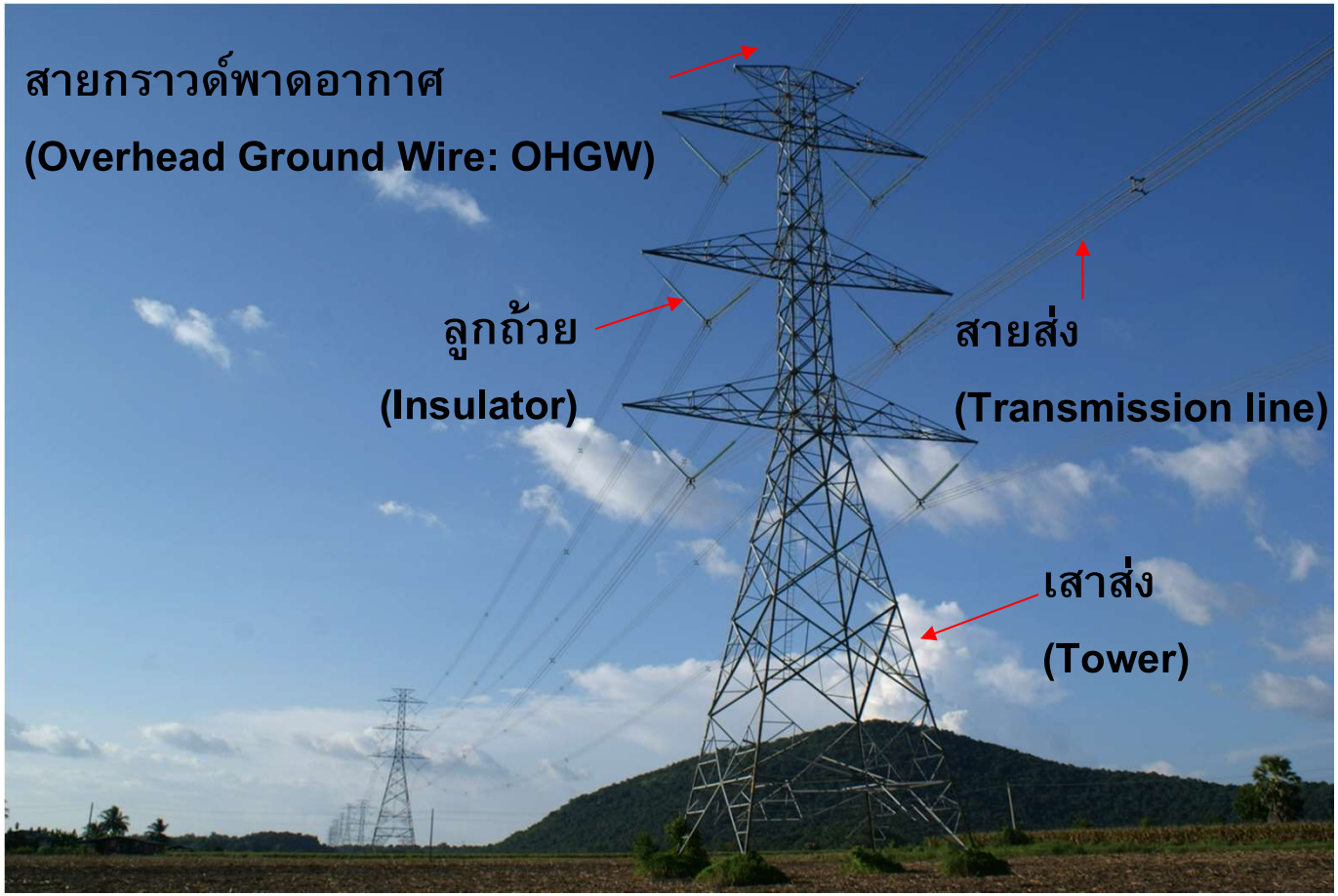
- เป็นระบบที่เชื่อมต่อจากโรงไฟฟ้าไปยังกลุ่มโหลดที่กระจายอยู่ตามภูมิภาคต่าง ๆ
- ระยะทางของสายส่งประเภทนี้อาจจะมีความยาวหลายร้อย km
- การไฟฟ้าฝ่ายผลิตรับผิดชอบในส่วนนี้ ดำเนินการส่งจ่ายด้วยระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 69kV, 115kV, 230kV และ 500kV

ระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง (ต่อ)

- ระดับแรงดันสูงที่ใช้ส่งกำลังไฟฟ้า

ประเภทแรงดัน	แรงดัน (kV)
แรงดันต่ำ (LV)	**< 1** (220/380 V)
แรงดันปานกลาง (MV)	**< 69** (11,12,22,24,33)
แรงดันสูง (HV)	**< 245** (69,115,230)
แรงดันสูงพิเศษ (EHV)	**< 765** (500)
แรงดันสูงยิ่งยวด (UHV)	**≥ 765**

ระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง (ต่อ)

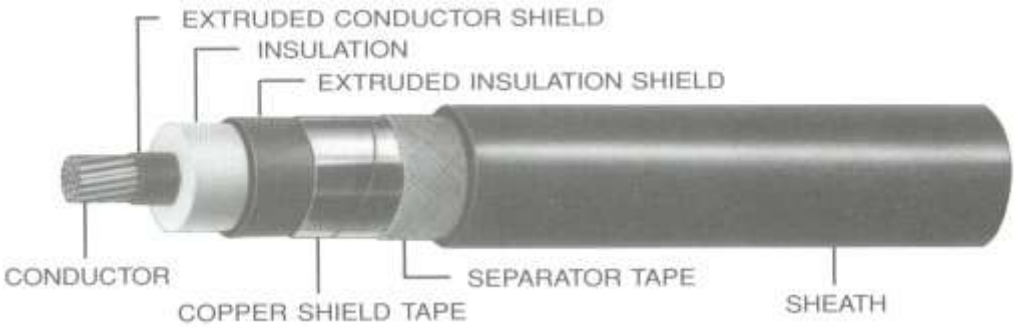


ประเภทของสายตัวนำ

สายตัวนำ คือ ตัวกลางในการนำพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าไปยังตำแหน่งต่าง ๆ แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1. สายเปลือย

2. สายหุ้มฉนวน



ประเภทของสายตัวนำ (ต่อ)

- ระบบส่งจ่ายและจำหน่ายของการไฟฟ้า นิยมใช้สายเปลือย สำหรับสายพาดอากาศ มักใช้กับระบบที่มีแรงดันตั้งแต่ 11-500kV
- สายหุ้มฉนวนที่ใช้สำหรับสายพาดอากาศจะใช้กับระดับแรงดัน 220V จนถึง 33kV
- สายหุ้มฉนวนในระบบสายใต้ดินจะใช้ตั้งแต่ 220V จนถึง 230kV
- สายตัวนำที่ใช้จะทำมาจากทองแดงหรืออะลิเนียมหรือผสมกัน อาจจะมีการเสริมด้วยลวดเหล็กเพื่อให้รับแรงดึงได้สูงขึ้น

สายเปลือย

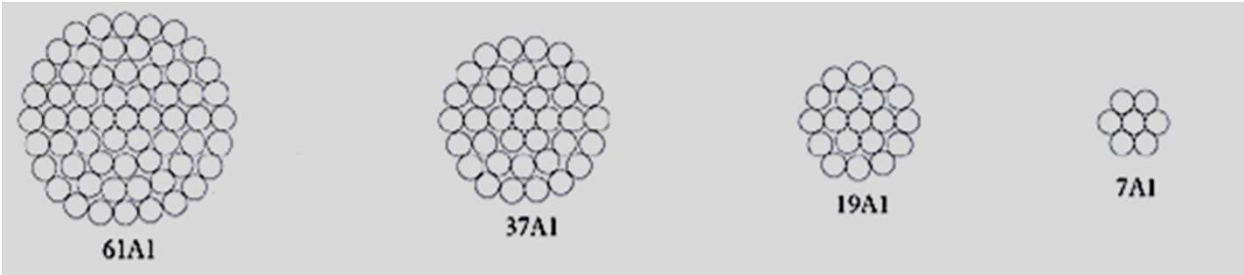
- สายอะลูมิเนียมล้วน (All Aluminum Conductor: AAC)
- สายอะลูมิเนียม-อัลลอย (All Aluminum Alloy Conductor: AAAC)
- สายอะลูมิเนียมเสริมเหล็ก (Aluminum Conductor Steel Reinforced: ACSR)
- สายอะลูมิเนียมเสริมอัลลอย (Aluminum Conductor Alloy Reinforced: ACAR)

นิยมใช้สายตัวนำเปลือยเดินลอยในอากาศ เรียกว่า สายส่งกำลังไฟฟ้าพาดในอากาศ (Overhead power line)

สายเปลือย (ต่อ)

❑ สายอะลูมิเนียมล้วน (All Aluminum Conductor: AAC)

เป็นสายอะลูมิเนียมเปลือย ตีเกลียว รับแรงดึงได้จำกัด ใช้กับเสาที่มีระยะห่างไม่เกิน 50 เมตร ส่วนมากใช้กับระบบสายป้อนจำหน่าย 11-33kV หรือระบบส่งจ่าย 69-115 kV



สายเปลือย (ต่อ)

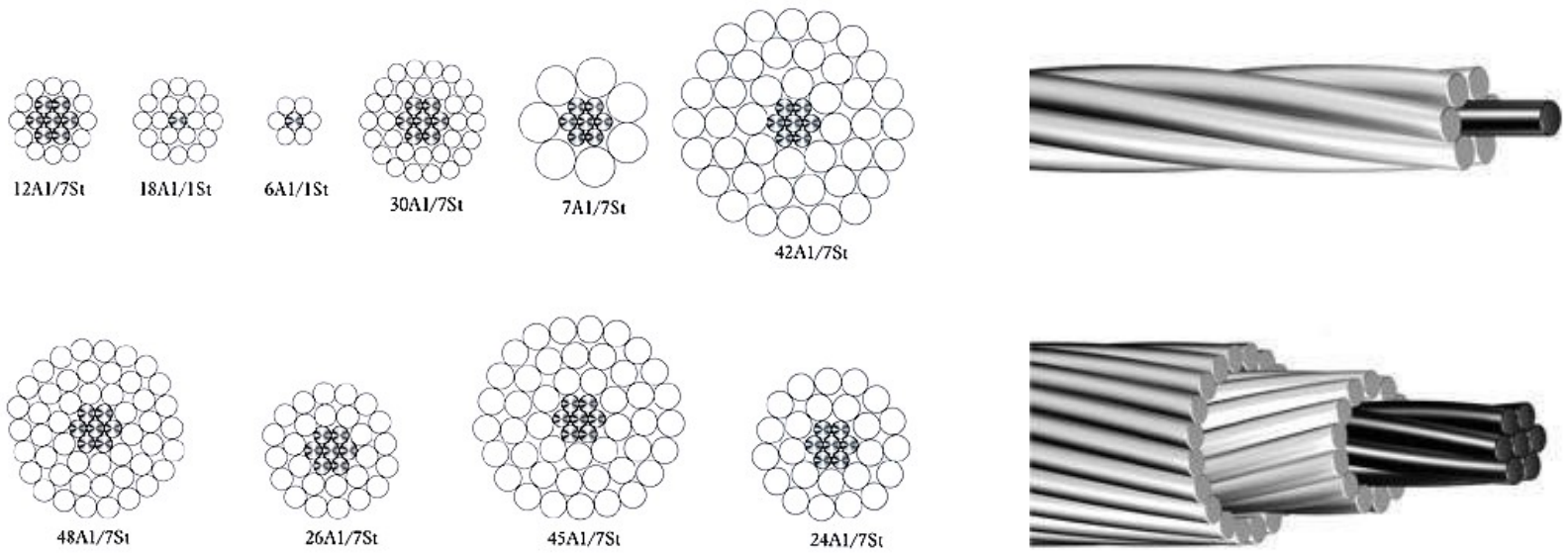
❑ สายอะลูมิเนียม-อัลลอย (All Aluminum Alloy Conductor: AAAC)

เป็นสายอะลูมิเนียมเจือ ส่วนใหญ่ผสมด้วยแมกนีเซียม มีความแข็งแรงและเบากว่าสาย AAC ใช้ติดตั้งกับระบบสายส่งที่มีระยะห่างระหว่างเสามาก และบริเวณชายทะเล

สายเปลือย (ต่อ)

❑ สายอะลูมิเนียมเสริมเหล็ก (Aluminum Conductor Steel Reinforced: ACSR)

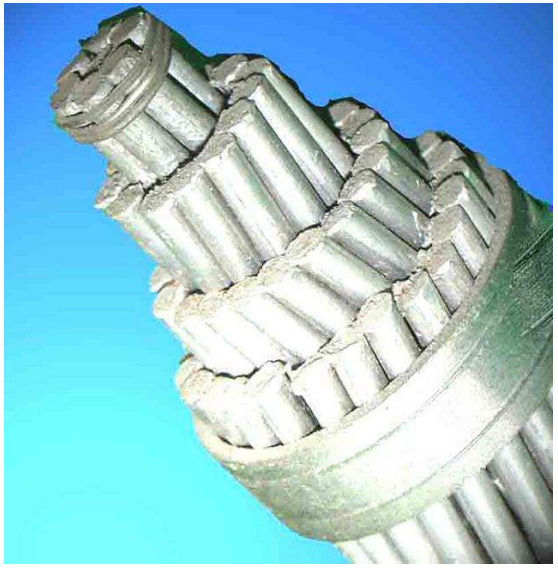
เป็นสายที่ทำจากอะลูมิเนียมตีเกลียวอยู่รอบ ๆ แกนกลางทำจากลวดเหล็กตีเกลียว เหมาะสำหรับเสาที่มีระยะห่างระหว่างเสามาก เช่น ระบบ 115-500kV

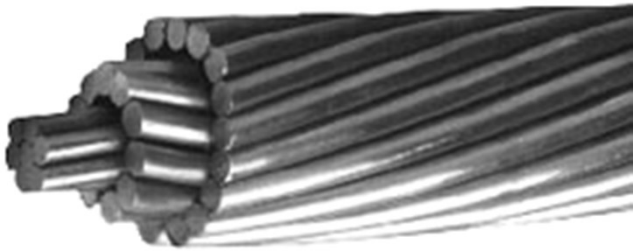


สายเปลือย (ต่อ)

❑ สายอะลูมิเนียมเสริมอัลลอย (Aluminum Conductor Alloy Reinforced: ACAR)

รับแรงดึงได้น้อยกว่า ACSR แต่ราคาแพงกว่า และมีน้ำหนักเบากว่า เหมาะสำหรับใช้งานบริเวณชายทะเล





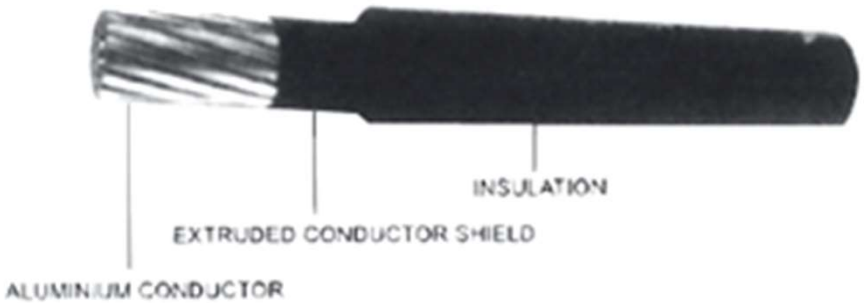
สายหุ้มฉนวน

- สายหุ้มฉนวนแรงสูงสองชั้นไม่เต็มพิกัด (Spaced Aerial Cable: SAC)
- สายหุ้มฉนวนแรงสูงเต็มพิกัด (Preassembly Aerial Cable: PAC)
- สายแรงต่ำชนิดทนสภาพอากาศ (Weatherproof Aluminium Conductor: AW)
- สายชนิด Self-supporting Service Drop Cable

สายหุ้มฉนวน (ต่อ)

- **สายหุ้มฉนวนแรงสูงสองชั้นไม่เต็มพิกัด (Spaced Aerial Cable: SAC)**

ใช้สำหรับระบบไฟฟ้า 11-33kV ทำด้วยอะลูมิเนียมตีเกลียวหุ้มด้วยฉนวนที่ทำจาก XLPE แต่จะไม่มี shield หุ้มอีกชั้น ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้กับบริเวณที่อาจจะมีการสัมผัสโดยโครงโลหะ หรือต้นไม้



สายหุ้มฉนวน (ต่อ)

- **สายหุ้มฉนวนแรงสูงเต็มพิกัด (Preassembly Aerial Cable: PAC)**

หรือสาย PIC เหมือนกับสาย SAC แต่จะมี shield หุ้มอีกชั้นหนึ่ง ทำให้มีความปลอดภัย น้ำหนักและราคาสูงกว่าสาย SAC

สายหุ้มฉนวน (ต่อ)

- **สายแรงต่ำชนิดทนสภาพอากาศ (Weatherproof Aluminium Conductor: AW)**

เป็นสายอะลูมิเนียมหุ้มฉนวน Polyethylene (PE) หรือ Polyvinyl Chloride (PVC) ทนต่อสภาพอากาศได้ดี นิยมใช้กับสายจำหน่ายแรงต่ำของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคและการไฟฟ้านครหลวง ฉนวนของสายชนิดนี้มีคุณสมบัติติดไฟ จึงไม่ควรนำมาใช้เดินสายภายในอาคาร

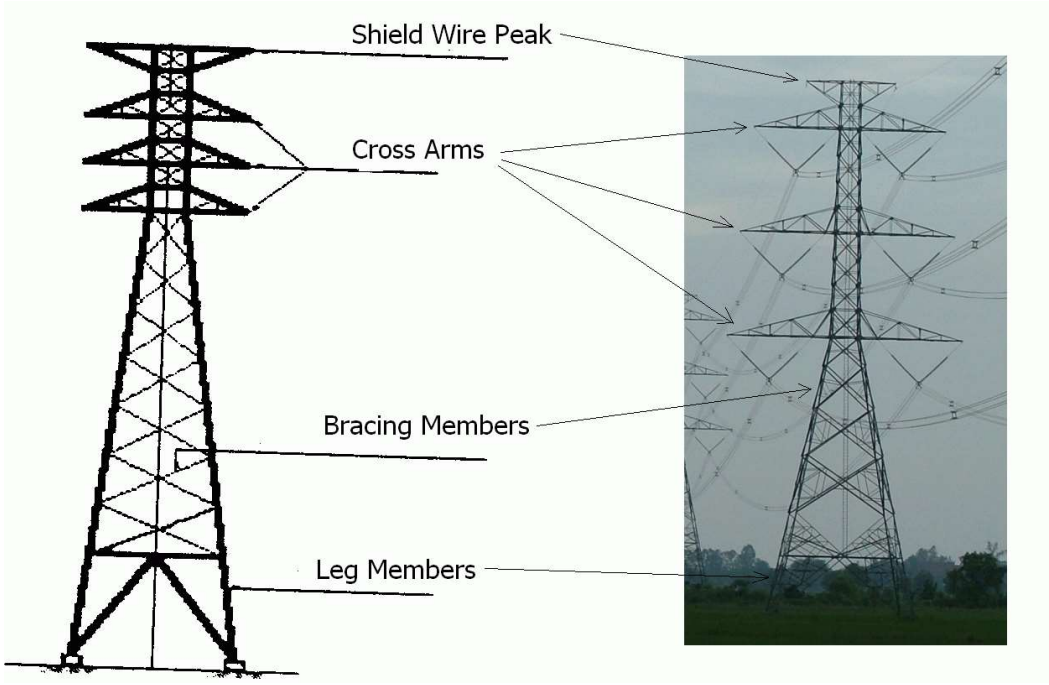
สายหุ้มฉนวน (ต่อ)

- **สายชนิด Self-supporting Service Drop Cable**

หรือเรียกว่าสาย multiplex เป็นสายอะลูมิเนียมหุ้มฉนวน XLPE มีความแข็งแรงทนทานต่อการเสียดสี นิยมใช้กรณีที่เดินข้ามถนนหรือต่อแยกจากสายป้อนหลักเข้าสู่ตัวอาคาร ใช้ระยะทางไม่ยาวมาก

เสาไฟฟ้า

เสาโครงเหล็กในประเทศไทยถูกใช้โดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิต ปกติเป็นเสาที่มี 4 ขา มีรูปร่างแตกต่างกันออกไปตามระดับแรงดันและจำนวนของวงจรที่ใช้ส่ง

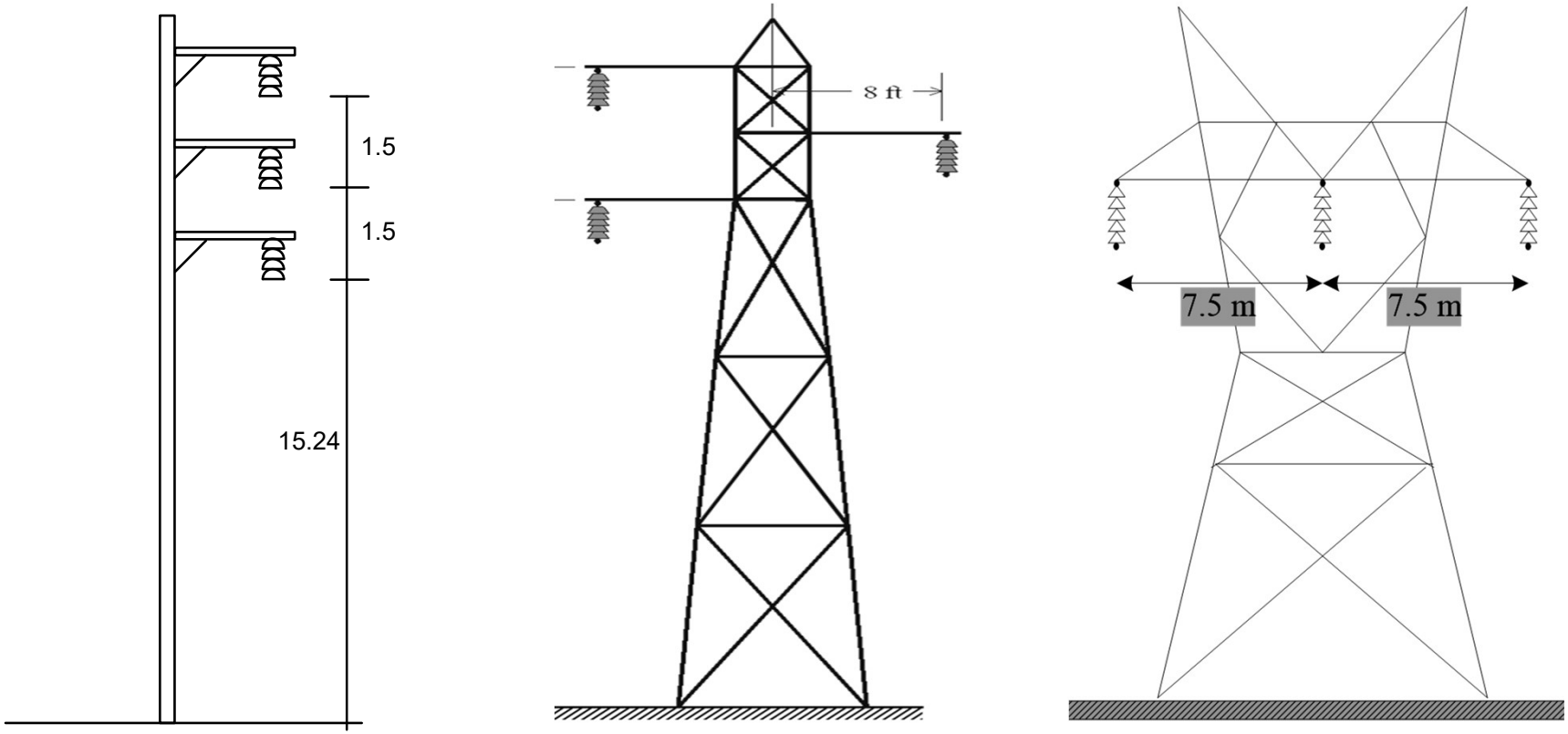


เสาไฟฟ้า (ต่อ)

- Shield Wire Peak เป็นส่วนที่ใช้วางสายป้องกันฟ้าผ่า OHGW

- Cross Arm เป็นส่วนที่ใช้แขวนสายตัวนำ อาจจะมีจำนวนแขนที่แตกต่างกันออกไปตามจำนวนวงจรย่อยที่ใช้ ปกติมีค่าเป็นจำนวนเท่าของ 3 สำหรับสายส่ง 3 เฟส มีการจัดวางตัวของครอสอาร์มได้หลายลักษณะ อาจจะจัดสายตามแนวนอน แนวตั้ง หรือรูปสามเหลี่ยมก็ได้

เสาไฟฟ้า (ต่อ)



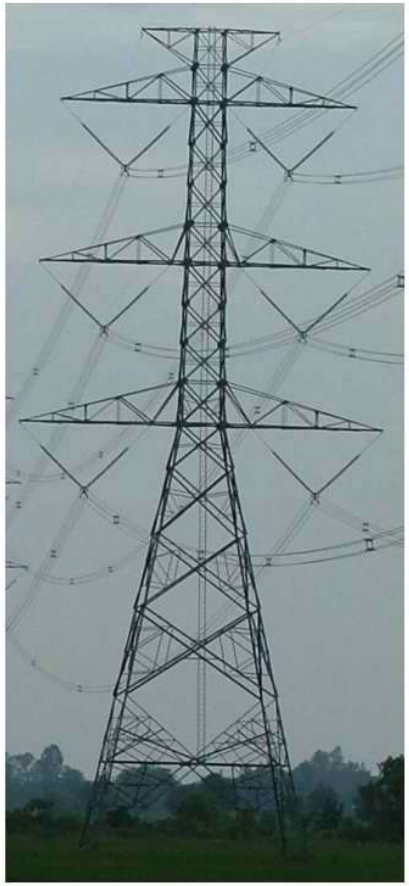
ตัวอย่างการจัดวางตัวของครอสอาร์ม

เสาไฟฟ้า (ต่อ)

สำหรับเสา 1 ต้นอาจจะมี 1 วงจร 2 วงจร หรือ 4 วงจรก็ได้ การจัดสายส่งตามรูปแบบต่าง ๆ มีปัจจัยหลายประการเข้ามาเกี่ยวข้อง

- ข้อจำกัดของพื้นที่
- ขอบเขตของแนวป้องกัน
- ราคาก่อสร้าง
- การเดินสายส่งในเขตชุมชน เขตป่าสงวน

เสาไฟฟ้า (ต่อ)


เสาไฟฟ้า (ต่อ)

ในกรณีของเสาโครงเหล็ก มีข้อกำหนดของความกว้างของเขตเดินสายและระยะห่างระหว่างเสาที่เหมาะสม ดังตาราง

แรงดัน (kV)	ระยะห่างระหว่างเสา (m)	ความกว้างของเขตเดินสาย (m)
115	330 – 350	24
230	400 – 450	40
500	400 – 500	60 – 70

เสาไฟฟ้า (ต่อ)

เสาคอนกรีตจะถูกนำมาใช้งานทั่วไปสำหรับระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคหรือการไฟฟ้านครหลวง ดังนี้

การไฟฟ้านครหลวง

- เสาขนาด 6 เมตร, 8.5 เมตร และ 10 เมตร ใช้กับระบบจำหน่าย 220/380 V
- เสาขนาด 12 เมตร และ 14 เมตร ใช้กับระบบจำหน่าย 12 kV และ 24 kV
- เสาขนาด 20 เมตร และ 22 เมตร ใช้กับระบบจำหน่าย 69V และ 115 kV

เสาไฟฟ้า (ต่อ)

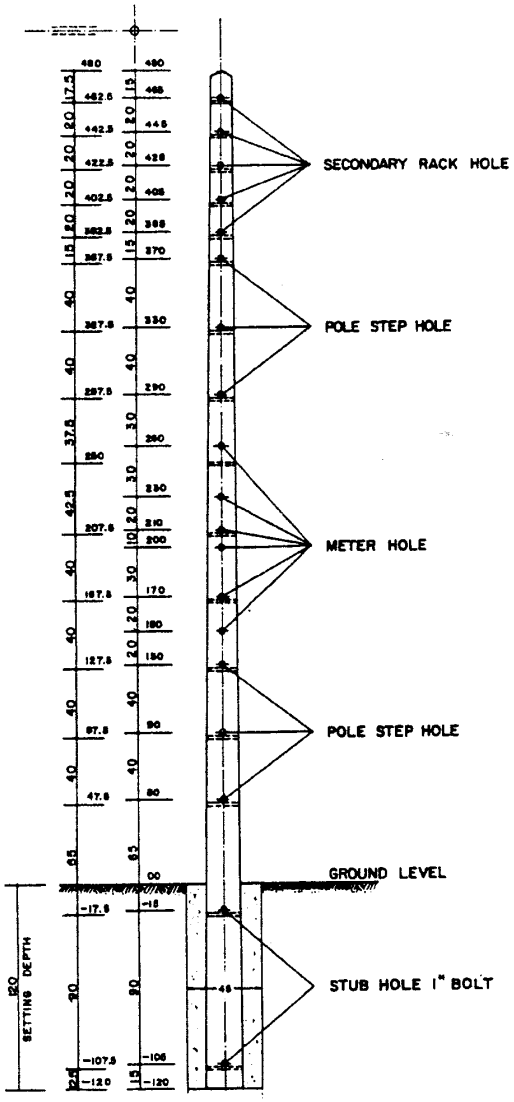
การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

- เสาขนาด 8 เมตร และ 9 เมตร ใช้กับระบบจำหน่าย 230/400 V
- เสาขนาด 12 เมตร, 12.2 เมตร, 14 เมตร, 14.3 เมตร และ 16 เมตร ใช้กับระบบจำหน่าย 11 kV, 22 kV และ 24 kV
- เสาขนาด 22 เมตร ใช้กับระบบจำหน่าย 115 kV

เสาไฟฟ้า (ต่อ)

เสาคอนกรีตจะมีการเจาะรูเอาไว้ตามระยะความสูงต่าง ๆ กัน โดยมีวัตถุประสงค์การใช้งานที่แตกต่างกัน

- รูสำหรับติดแร็กเดินสาย (secondary rack holes)
- รูสำหรับติดตั้งอุปกรณ์ในระบบจำหน่าย เช่น หม้อแปลง โคมไฟถนน หรือตัวเก็บประจุ เป็นต้น
- รูสำหรับติดตั้งเครื่องมือวัด (meter holes)
- รูสำหรับจับยึดกับตอหม้อ (stub holes)
- อื่น ๆ


SECONDARY RACK HOLE
POLE STEP HOLE
METER HOLE
POLE STEP HOLE
GROUND LEVEL
STUB HOLE 1" BOLT
SETTING DEPTH

ลูกถ้วย

- เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่รองรับการเชื่อมต่อและจับยึดสายไฟหรืออุปกรณ์อื่น ๆ ให้อยู่ในตำแหน่งที่มั่นคง
- มีคุณสมบัติเป็นฉนวน ทำให้ป้องกันกระแสไฟฟ้ารั่วลงดินได้
- ทำจากวัสดุเซรามิกหรือพอลิเมอร์ เช่น กระเบื้องเคลือบ
- มีความแข็งเปราะ บริเวณผิวเคลือบเป็นมัน

ชนิดลูกถ้วย (ต่อ)

- ลูกถ้วยมะเฟือง (strain type insulator)
- ลูกถ้วยลูกรอก (spool type insulator)
- ลูกถ้วยก้านตรง (pin type insulator)
- ลูกถ้วยติดเสาหรือลูกถ้วยแท่ง (line post type insulator)
- ลูกถ้วยแขวน (suspension type insulator)
- ลูกถ้วยรองรับอุปกรณ์ (apparatus post type insulator)

ชนิดลูกถ้วย (ต่อ)

➢ ลูกถ้วยมะเฟือง (strain type insulator)

ใช้สำหรับคั่นสายยึดโยง ไม่ให้ต่อลงดินโดยตรง เพื่อป้องกันกระแสไฟฟ้ารั่วที่ลงมาตามสายยึดโยง เนื่องจากทำจากวัสดุประเภทกระเบื้องเคลือบ จะทนแรงกดมากกว่าแรงดึงมาก

ชนิดลูกถ้วย (ต่อ)

➢ ลูกถ้วยลูกรอก (spool type insulator)

เป็นอุปกรณ์รองรับสายส่ง มีรูปร่างคล้ายหลอดด้าย ตรงกลางเจาะทะลุเป็นรูสำหรับร้อยแกนเหล็กยึดติดกับแร็ก นิยมใช้ในระบบจำหน่ายแรงต่ำ

ชนิดลูกถ้วย (ต่อ)

➢ ลูกถ้วยก้านตรง (pin type insulator)

เป็นอุปกรณ์รองรับสายส่งในระบบจำหน่ายแรงสูงตั้งแต่ 33 kV ลงมา นิยมทำเป็นครีบ มีหลายชั้นลดหลั่นกันตามระดับแรงดัน ด้านบนของลูกถ้วยทำเป็นร่องสำหรับรองรับสาย และเคลือบด้วยสารกึ่งตัวนำ เพื่อป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนสายรบกวนระบบสื่อสาร

ชนิดลูกถ้วย (ต่อ)

➢ ลูกถ้วยติดเสาหรือลูกถ้วยแท่ง (line post type insulator)

มีรูปร่างคล้ายกับลูกถ้วยก้านตรง แต่มีจำนวนครีบมากกว่า ส่วนใหญ่จะใช้กับบริเวณทางโค้งหรือทางแคบ ๆ แบ่งเป็น 2 ประเภทคือ

- ลูกถ้วยแท่งทางนอน นิยมใช้กับสายส่ง 69 kV ขึ้นไป
- ลูกถ้วยแท่งทางตั้ง นิยมใช้กับสายส่ง 22 – 33 kV

ชนิดลูกถ้วย (ต่อ)

➢ ลูกถ้วยแขวน (suspension type insulator)

เป็นลูกถ้วยแรงสูงที่สามารถนำมาต่อเรียงกันเพื่อใช้กับแรงดันหลายขนาด นิยมใช้กับแรงดันตั้งแต่ 69 kV ขึ้นไป ในระบบ 11-33 kV จะใช้ติดตั้งเฉพาะที่ เช่น ที่เสาต้นแรกหรือต้นสุดท้ายของสายส่ง

ชนิดลูกถ้วย (ต่อ)

➢ ลูกถ้วยแขวน (ต่อ)

จำนวนลูกถ้วยแขวนต่อ 1 พวงลูกถ้วยหาได้จาก

$$\boxed{n = \frac{kV}{16}}$$

เมื่อ n แทนจำนวนลูกถ้วยแขวนที่ใช้

kV เป็นค่าพิกัดของระบบไฟฟ้ากำลังที่ลูกถ้วยนำไปใช้งาน

ชนิดลูกถ้วย (ต่อ)

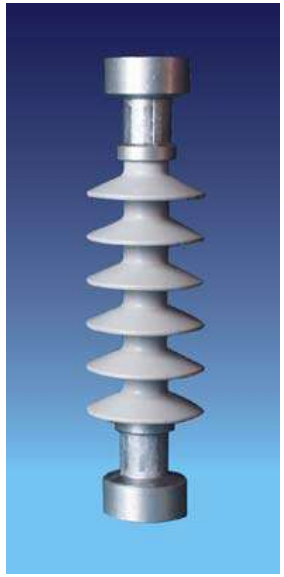
คุณสมบัติเด่นของลูกถ้วยแขวน

- สามารถใช้งานได้ในหลายระดับแรงดันโดยการต่อเพิ่มจำนวนของลูกถ้วยให้พอเหมาะ
- สามารถตั้งแขวนเพื่อรับแรงดึงของสายในแนวดิ่ง หรือติดตั้งในแนวนอนเพื่อรับแรงดึงในแนวระนาบได้
- สามารถถอดเปลี่ยนได้กรณีลูกใดลูกหนึ่งชำรุด ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่าย

ชนิดลูกถ้วย (ต่อ)

➢ ลูกถ้วยรองรับอุปกรณ์ (apparatus post type insulator)

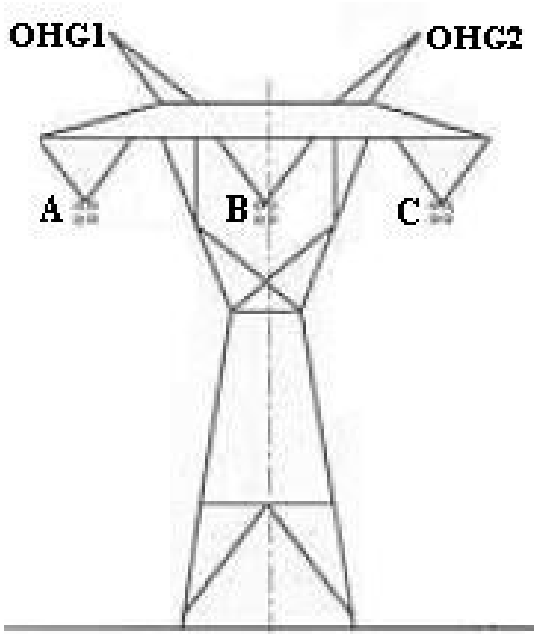
เป็นลูกถ้วยที่ออกแบบสำหรับยึดติดกับอุปกรณ์โดยเฉพาะ ส่วนบนและส่วนล่างจะหุ้มด้วยโลหะ และเจาะรูไว้สำหรับยึดอุปกรณ์ สามารถนำมาต่อไว้หลายชั้น

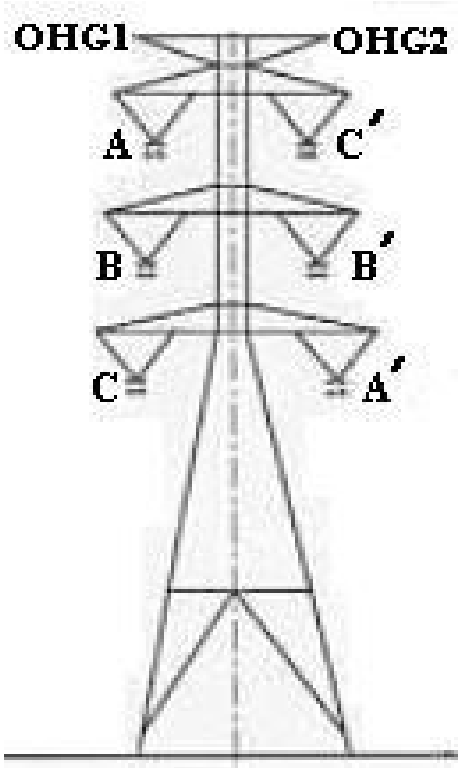


สายกราวด์พาดอากาศ

- เป็นสายดินที่พาดอยู่บนส่วนยอดของเสา และอยู่เหนือสายส่งกำลัง
- สายนี้จะถูกต่อลงดินที่โคนเสาทุก ๆ ต้น
- สามารถลดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อเกิดฟ้าผ่าได้
- สามารถป้องกันผลที่เกิดจากการฟ้าผ่าได้โดยตรง
- คุณสมบัติของสายดินนี้ต้องมีค่าความต้านทานที่ต่ำมาก ๆ ($R<10\ \Omega$)
- เป็นสายทองแดงหรือสายตีเกลียว

สายกราวด์พาดอากาศ (ต่อ)





โคโรนา (Corona)

- เมื่อค่าความเครียดของสนามไฟฟ้ารอบ ๆ ผิวนอกของสายตัวนำเพิ่มสูงขึ้น เกินค่าสูงสุดของไดอิเล็กทริก อากาศรอบ ๆ ผิวของสายตัวนำจะเกิดการแตกประจุบางส่วน ที่เรียกกันว่า “โคโรนา”
- ผลของโคโรนาทำให้เกิด
  - กำลังงานสูญเสียในรูปของกำลังไฟฟ้า ในรูปของเสียงที่มนุษย์สามารถได้ยิน
  - แสงที่ตามนุษย์มองเห็นได้
  - คลื่นรบกวนไปแทรกสอดคลื่นวิทยุโทรทัศน์

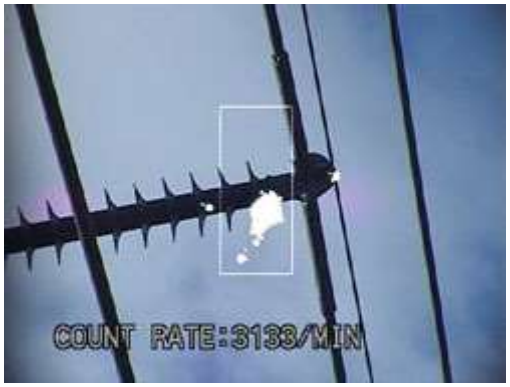
โคโรนา (ต่อ)

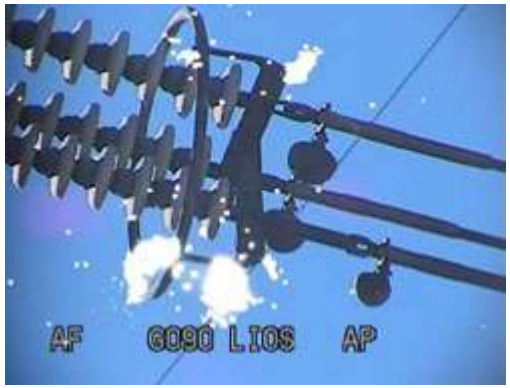
- ปัจจัยที่ทำให้เกิดโคโรนา

  - ขนาด ชนิดและการวางตัวของสายตัวนำ

  - สภาวะแวดล้อมรอบ ๆ ผิวของตัวนำ ได้แก่ สภาพอากาศ ความชื้น อุณหภูมิ ความสกปรกของพื้นผิวตัวนำ เป็นต้น

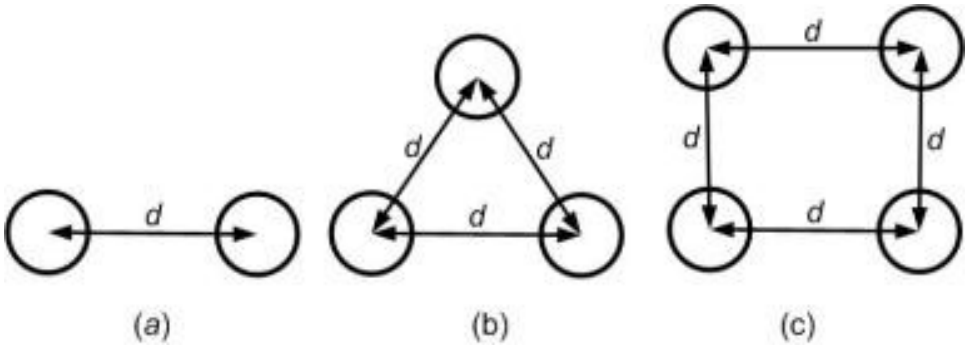
- สามารถลดผลการเกิดโคโรนาได้โดยการเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำหรือใช้สายควบ





สายควบ (Bundled Conductors)

- เป็นสายไฟตัวนำธรรมดาทั่ว ๆ ไป
- เป็นการจัดให้กระแสมีการแยกไหลไปยังตัวนำย่อย
- เพื่อลดความเครียดสนามไฟฟ้ารอบ ๆ ตัวนำลง
- เพื่อลดหรือป้องกันการเกิดปรากฏการณ์โคโรนา (Corona Effect)



Spacing of Conductors (Bunding Spacer)

- เป็นอุปกรณ์คั่นสายควบ ทำจากโลหะอลูมิเนียมผสม
- เพื่อให้สายส่งเฟสเดียวกันมีระยะห่างเท่ากันตลอดสาย
- ป้องกันไม่ให้เกิดปัญหาการแกว่งพันกันของสายเมื่อมีลมปะทะ
- ป้องกันการเกิดแรงดูดระหว่างสายเมื่อมีกระแสไหลผ่าน
- โดยทั่วไปจะค้ำสายให้ห่างกันประมาณ 20- 40 cm
- วางเป็นช่วง ๆ ให้มีระยะห่างกันประมาณ 15- 40 m

Spacing of Conductors (ต่อ)

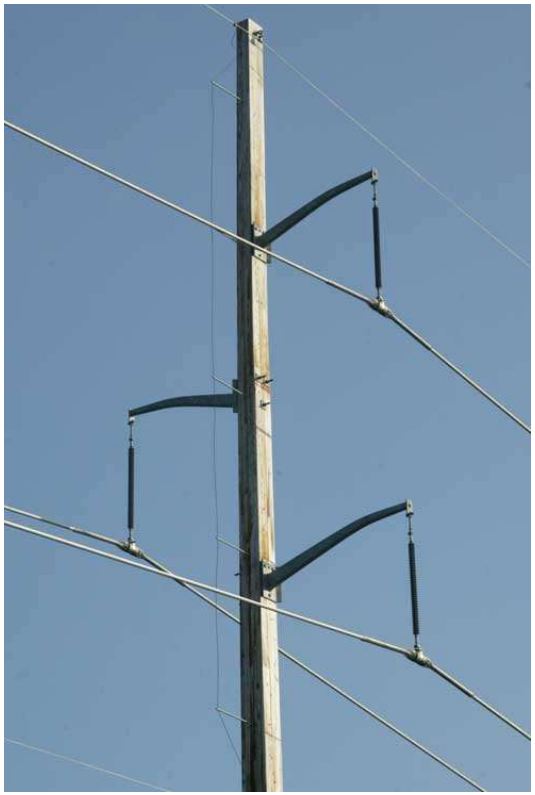
Line-to-Line voltage (kV)	Equivalent Spacing (m)
11	1
33	1.3
69	2.7
115	5.1
230	10.2

วงจรสายส่ง (Transsmission Line Circuit)

- วงจรเดี่ยว ตัวนำเดี่ยว (Single circuit, Single conductor)
- วงจรเดี่ยว หลายตัวนำ (Single circuit, N-bundle)
- วงจรคู่ ตัวนำเดี่ยว (Double circuit, Single conductor)
- วงจรคู่ หลายตัวนำ (Double circuit, N-bundle)
- หลายวงจร หลายตัวนำ (N-circuit, N-bundle)
- วงจรขนาน (Parallel circuit)

วงจรสายส่ง (ต่อ)

- วงจรเดี่ยว ตัวนำเดี่ยว (Single circuit, Single conductor)



วงจรสายส่ง (ต่อ)

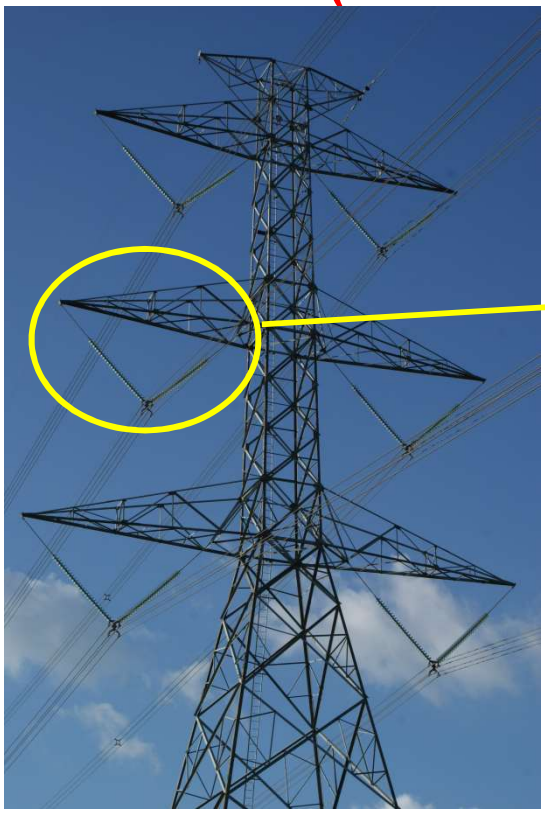
- วงจรเดี่ยว หลายตัวนำ (Single circuit, N-bundle)

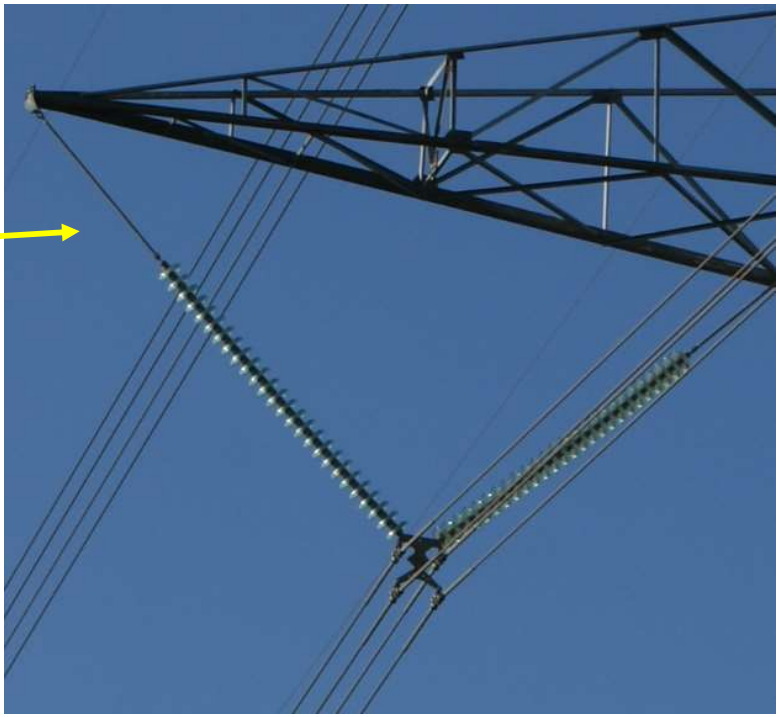
วงจรสายส่ง (ต่อ)

- วงจรคู่ ตัวนำเดี่ยว (Double circuit, Single conductor)

วงจรสายส่ง (ต่อ)

- วงจรคู่ หลายตัวนำ (Double circuit, N-bundle)



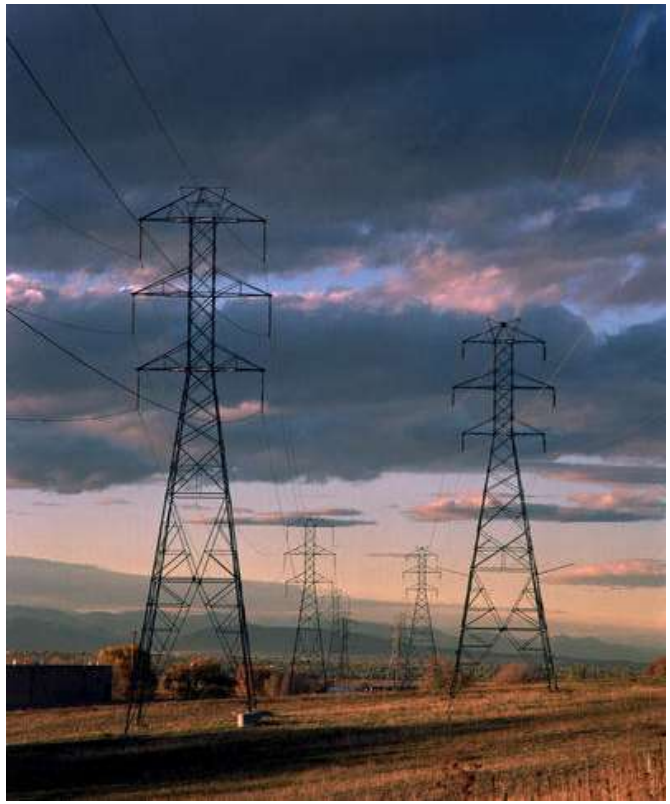


วงจรสายส่ง (ต่อ)

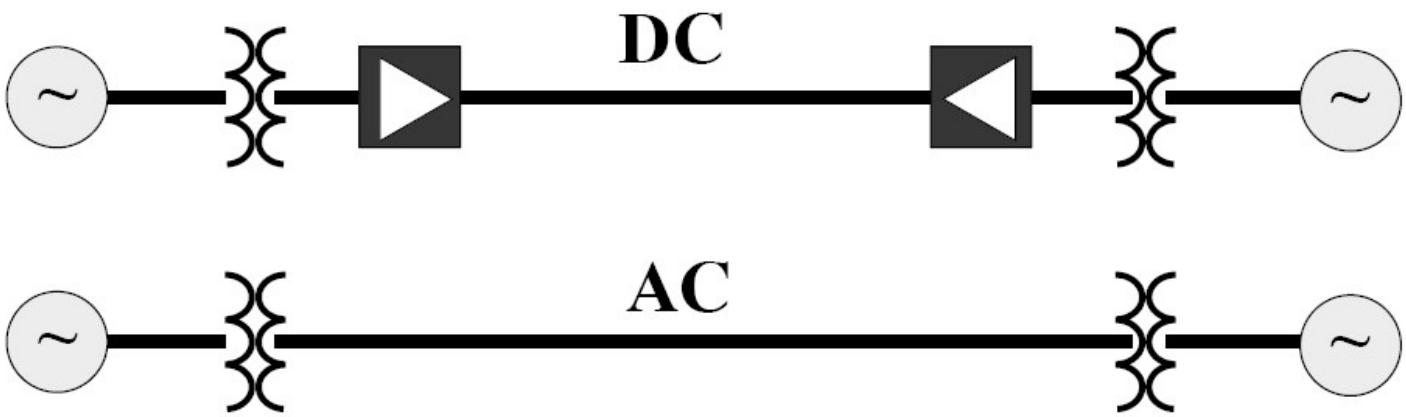
- หลายวงจร หลายตัวนำ (N-circuit, N-bundle)

วงจรสายส่ง (ต่อ)

- วงจรขนาน (Parallel circuit)



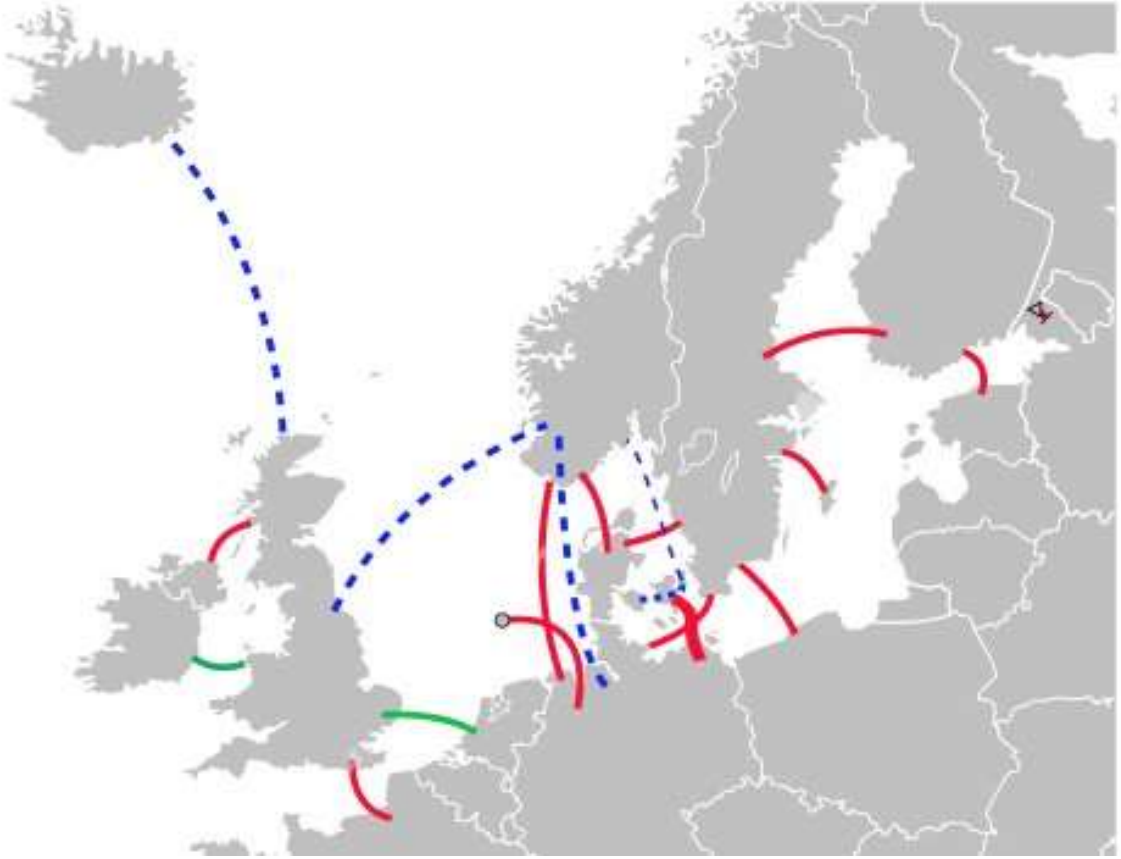
ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง (HVDC)



ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง (ต่อ)

- HVDC สามารถส่งเป็นระยะทางไกล ๆ ได้โดยไม่มีข้อจำกัด
- ไม่มีปัญหาเรื่องความถี่ของระบบ ณ จุดที่ต้องการเชื่อมต่อ
- ไม่มี Reactive power losses การป้องกันสายส่งไม่ยุ่งยาก
- HVDC มีความมั่นคงของระบบสูง ระบบด้านหนึ่งผิดปกติก็ไม่ส่งผลมาถึงอีกระบบอีกด้านหนึ่ง
- สามารถถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าให้กันได้ ถ้าระบบทั้ง 2 จุดต่างกัน
- อุปกรณ์ converter มีราคาแพง การพัฒนาด้านเทคโนโลยีน้อยกว่า AC

ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง (ต่อ)

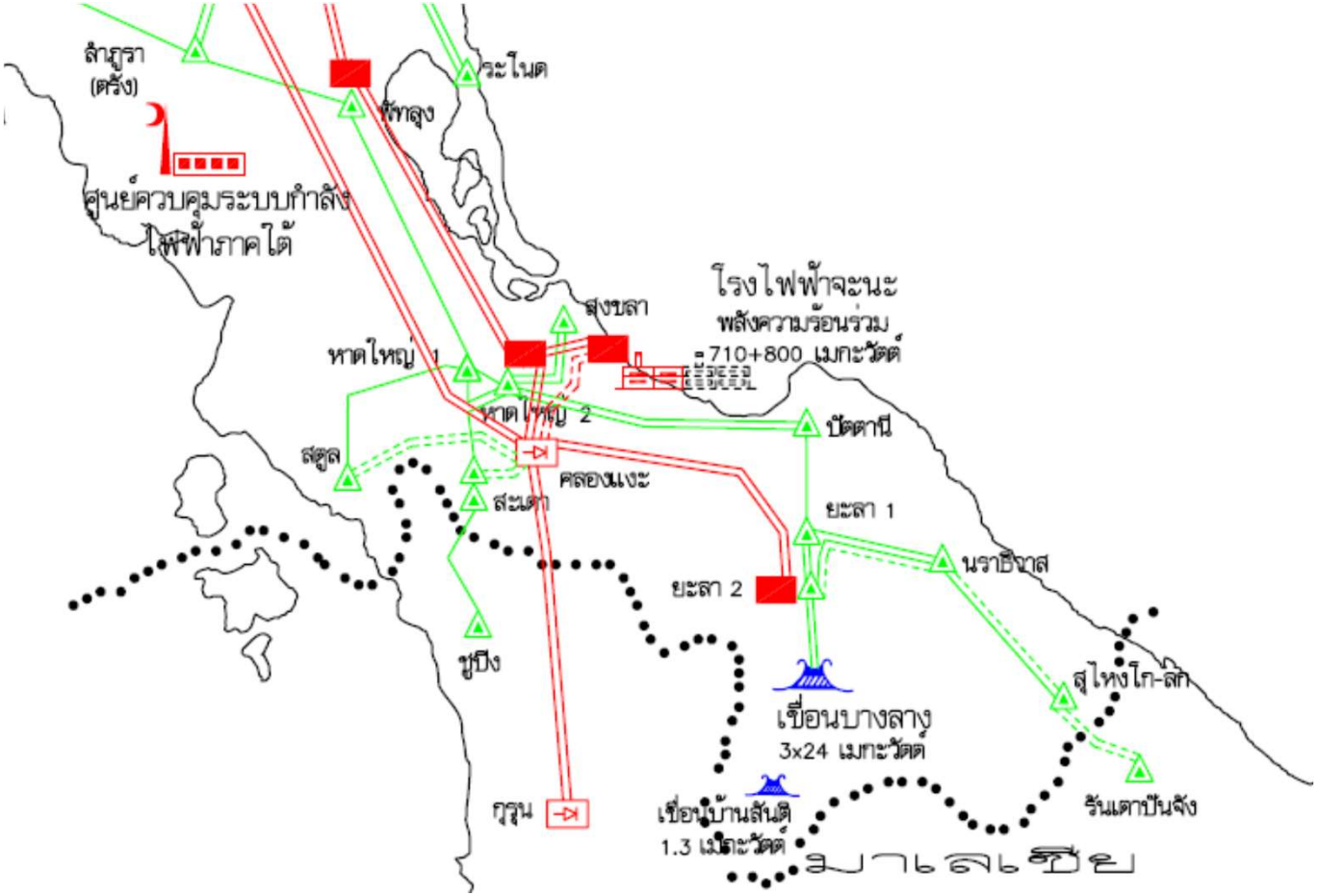


HVDC Connections in west Europe

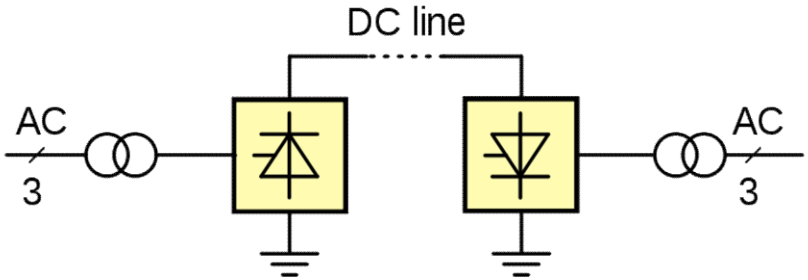
ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง (ต่อ)

- ปัจจุบัน HVDC มีที่สถานีไฟฟ้าแรงสูงคลองแงะ จ.สงขลา
- ซื้อขายไฟกับสถานีไฟฟ้าแรงสูงกุรุน ประเทศมาเลเซีย (110 km) ที่ระดับแรงดัน 300 kV (DC) 300 MW
- แปลงให้เป็นระบบไฟฟ้า AC ที่ระดับแรงดัน 115 kV และ 230 kV แล้วจ่ายให้กับสถานีไฟฟ้าหาดใหญ่ 2 ทุ่งสง และยะลา 2 ตั้งแต่ปี 2545

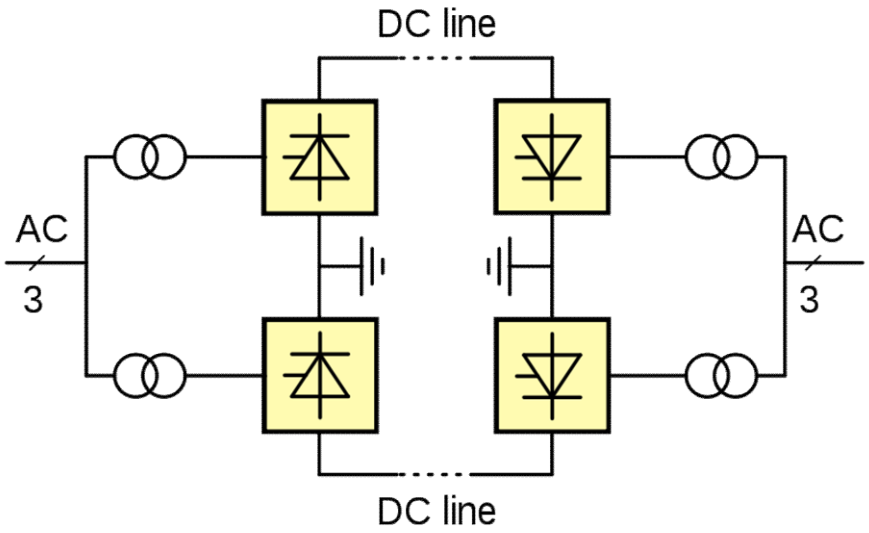
ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง (ต่อ)



ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง (ต่อ)



monopolar



bipolar

ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง (ต่อ)

สาเหตุที่สร้างระบบเชื่อมโยง HVDC ในประเทศไทย

- เพื่อแก้ปัญหาไฟฟ้าไม่พอใช้ในภาคใต้
- เพื่อแก้ปัญหาการเชื่อมระบบไฟฟ้าระหว่างประเทศที่มีระบบไม่เหมือนกัน

ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง (ต่อ)

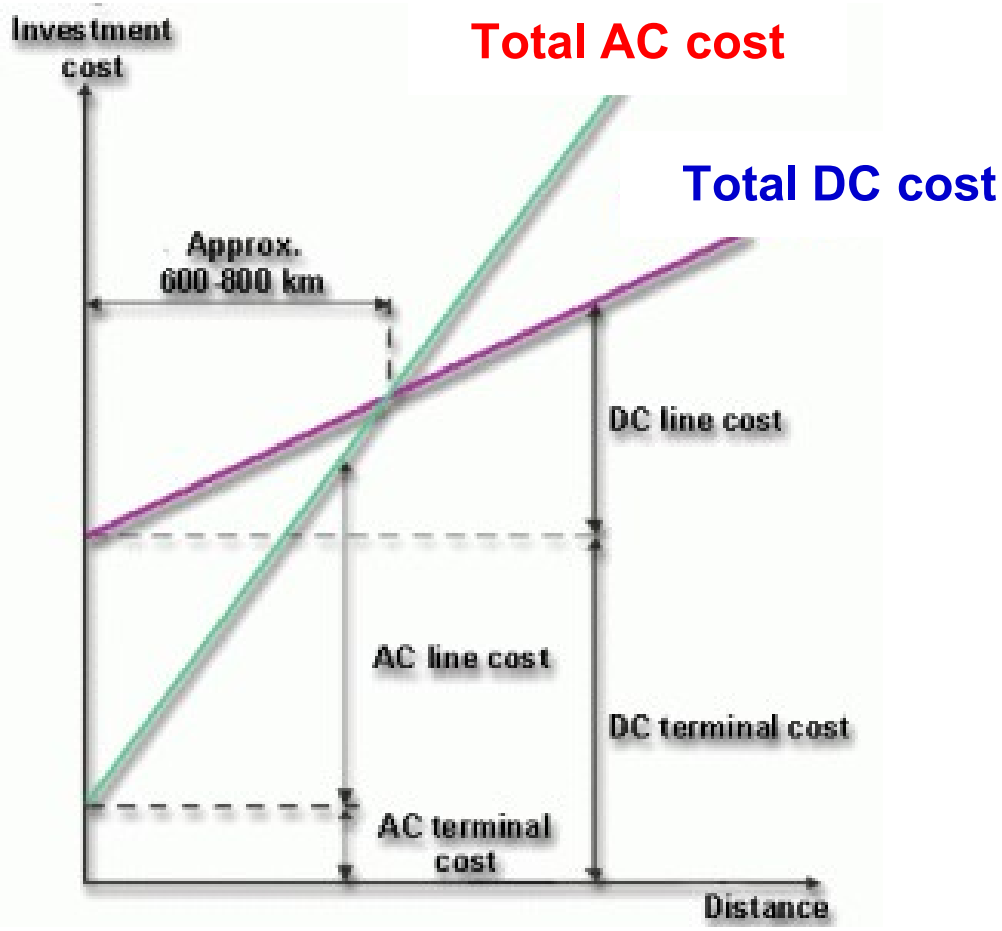
235-MVA-HVDC power transformer

Converter

ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง (ต่อ)

Yun-Guang UHVDC Project **the first in the world to transmit electricity at a DC voltage of ± 800 kV with a power transmission capacity of 5000 MW; Yunnan via 1,400 km to Guangzhou**

ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง (ต่อ)



จบการบรรยายหัวข้อ
สายส่งไฟฟ้าแรงสูง