2102-252: บทที่ 5
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

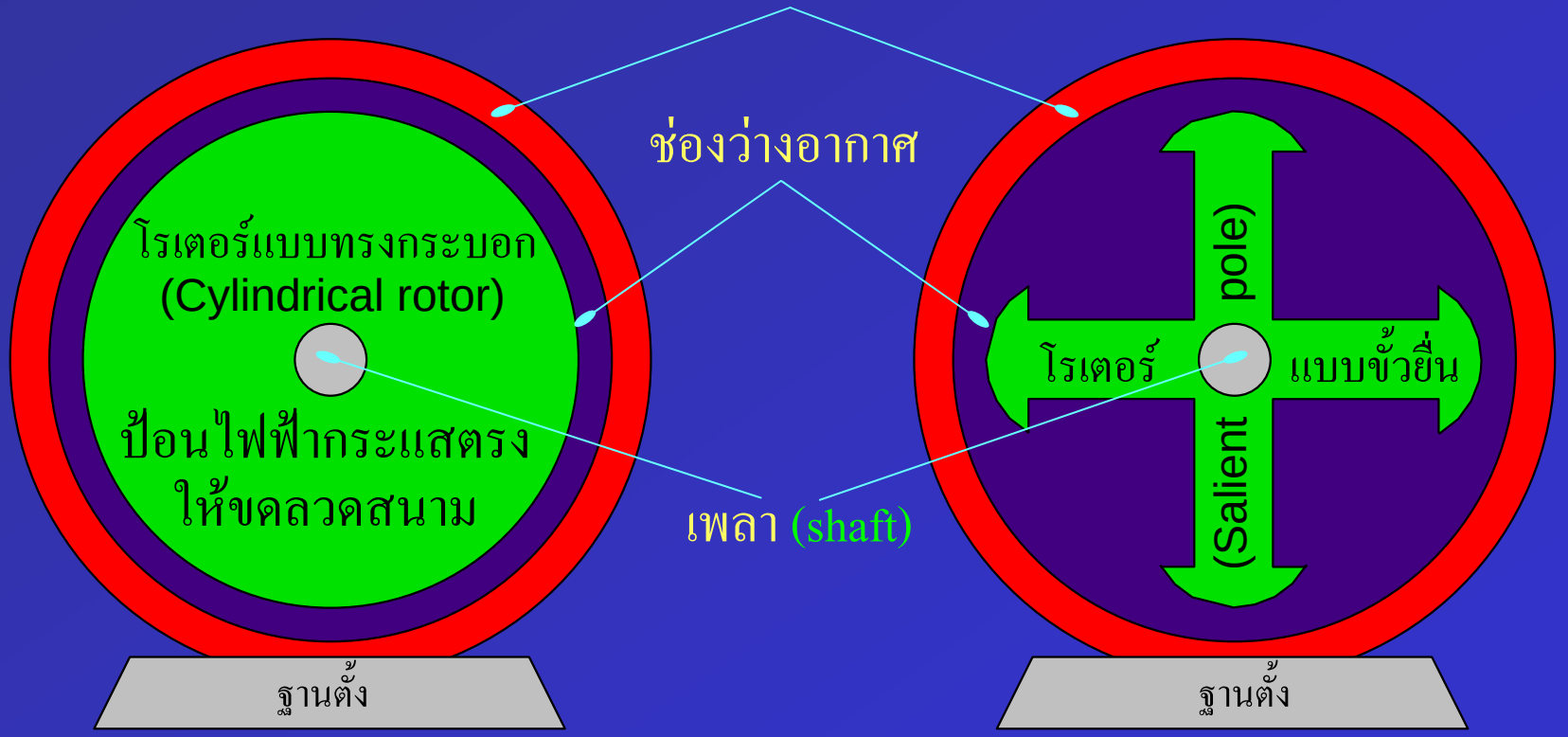
สารบัญ

- โครงสร้างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส
- หลักการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส
- วงจรสมมูลและแผนภาพเฟสเซอร์
- กำลังและแรงบิดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส
- การทดสอบเพื่อหาพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส
- ลักษณะเฉพาะเมื่อจ่ายโหลดและโวลเตจเรกูเลชัน

โครงสร้าง

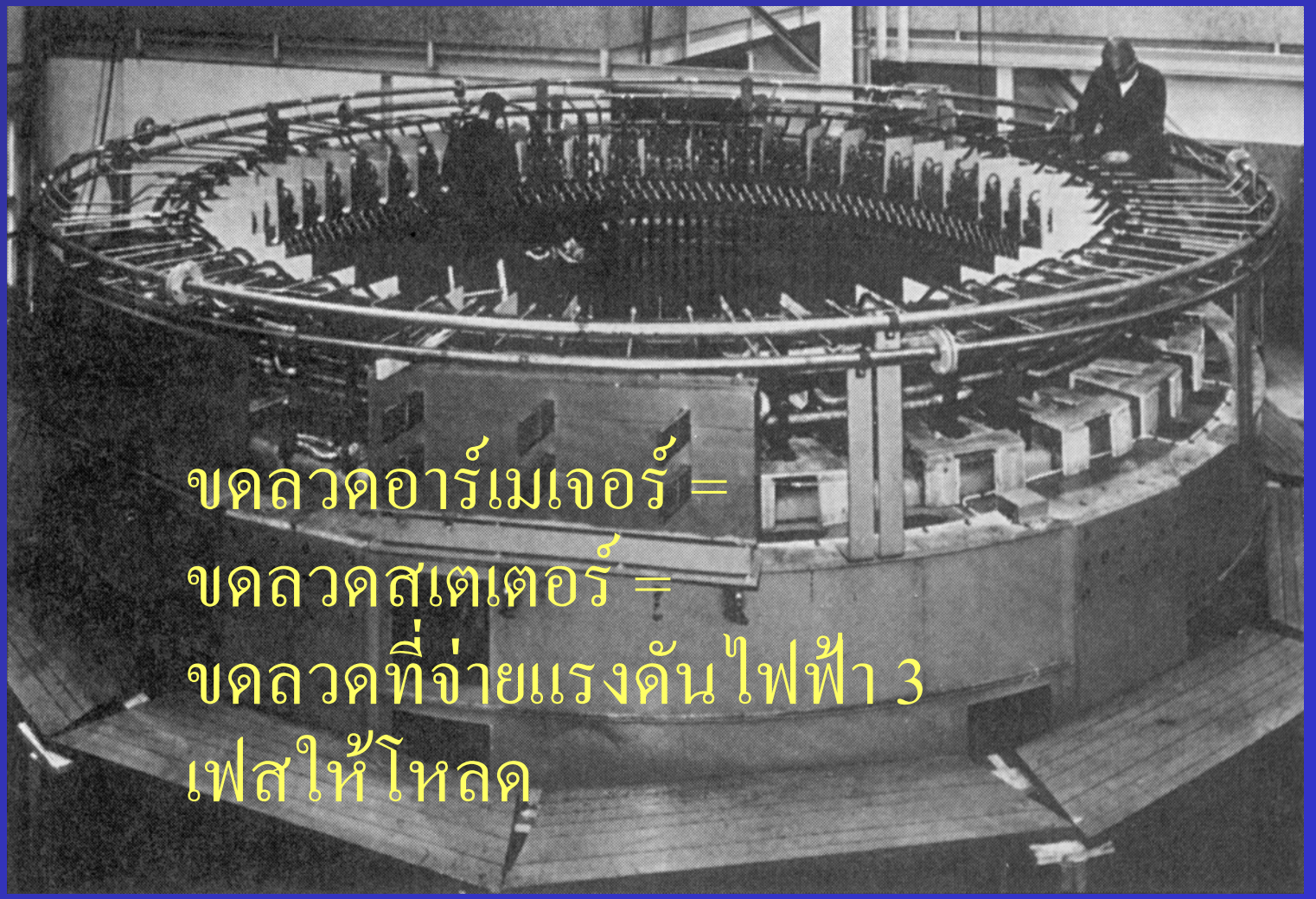
หน้าที่: แปลงพลังงานกลไปเป็นพลังงานไฟฟ้า

สเตเตอร์ (stator) : ฝังขดลวดอาร์เมเจอร์ที่จ่ายไฟฟ้ากระแสสลับให้โหลด



โครงสร้าง 2/12

สเตเตอร์:



โครงสร้าง 3/12

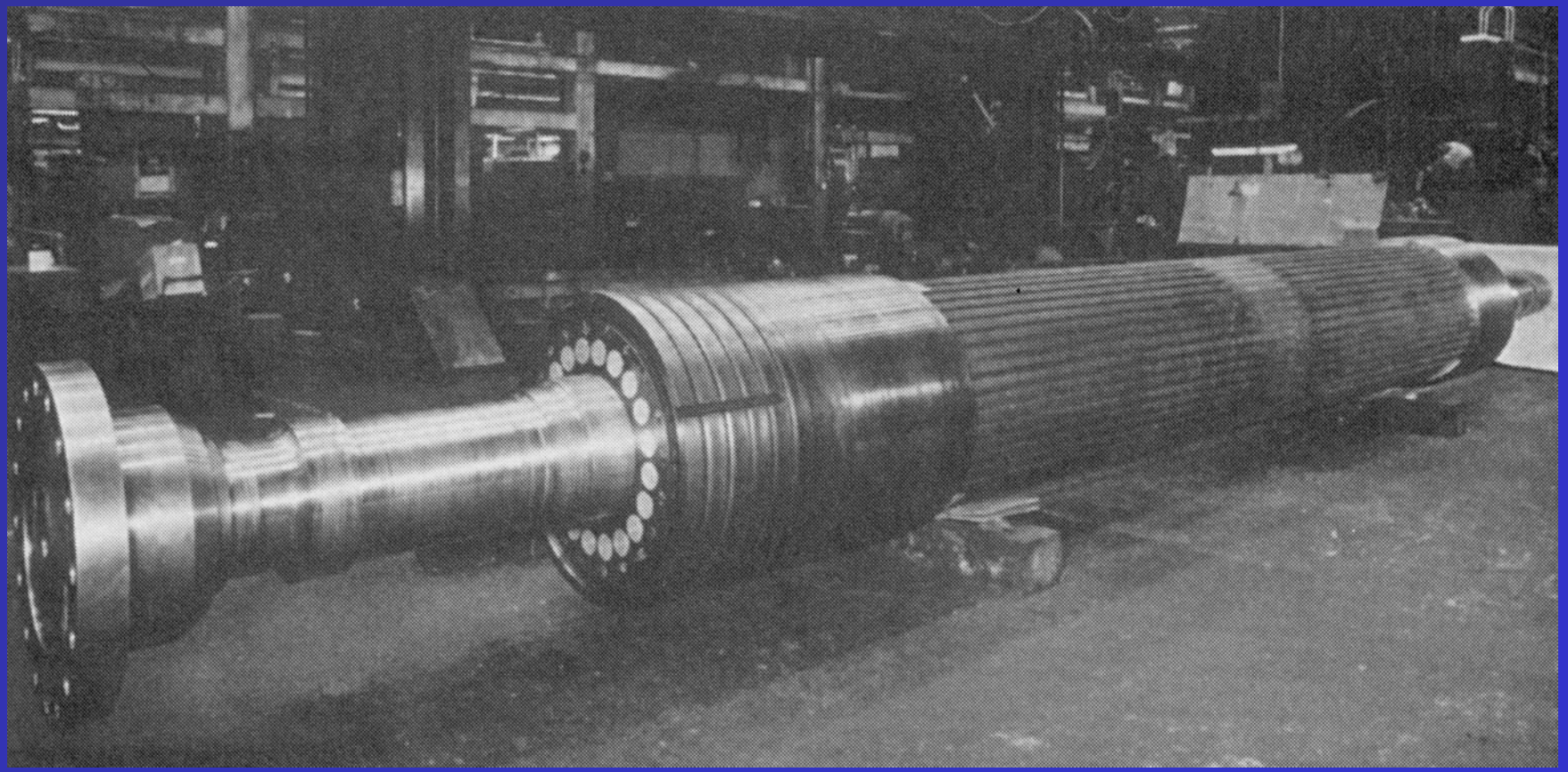
โรเตอร์: แบบทรงกระบอก หรือ nonsalient pole ในรูปเป็นแบบ 2 ขั้ว

End view Side view

ขดลวดสนาม = ขดลวดโรเตอร์ = ขดลวดที่รับไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อสร้างสนามแม่เหล็ก

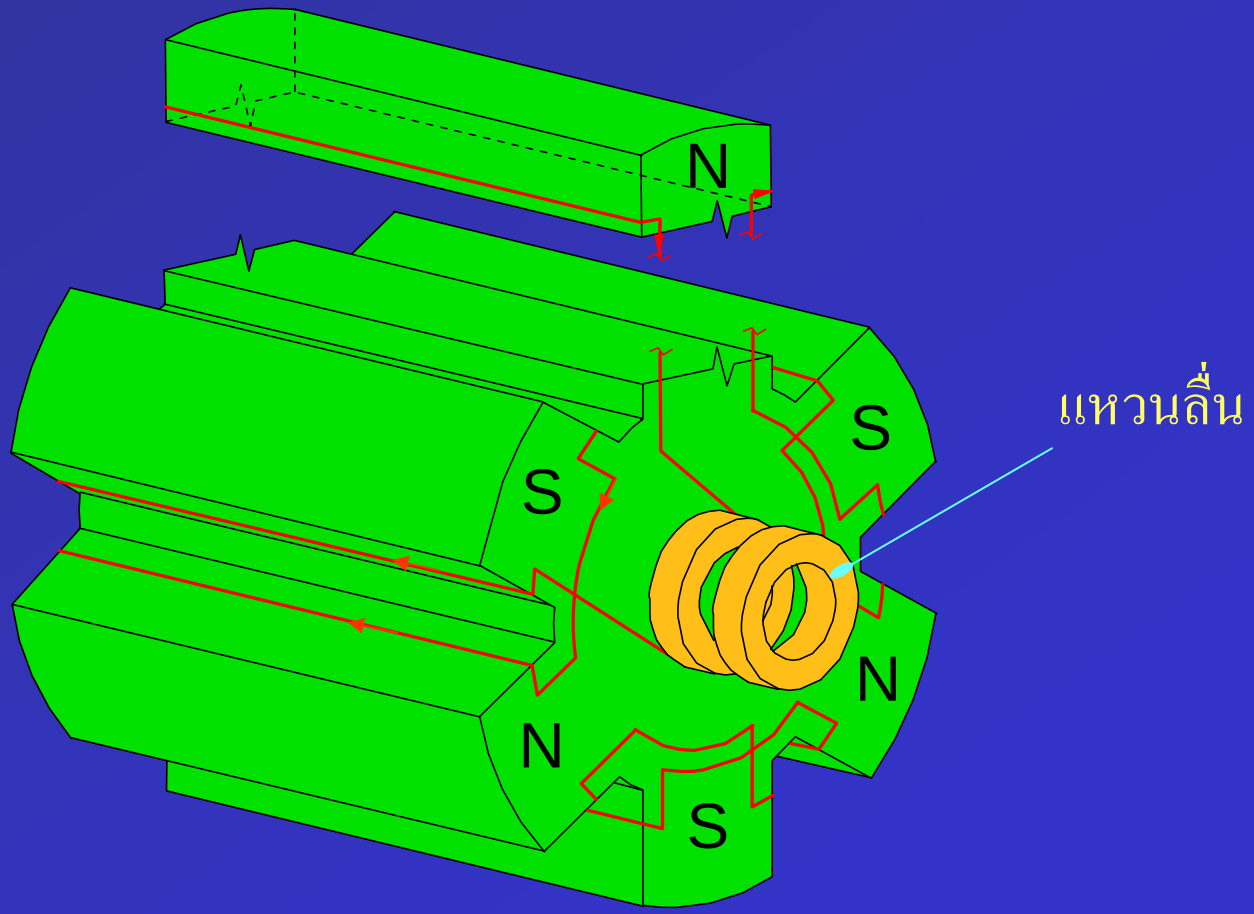
โครงสร้าง 4/12

โรเตอร์: แบบทรงกระบอก ในรูปเป็นแบบ 2 ขั้ว



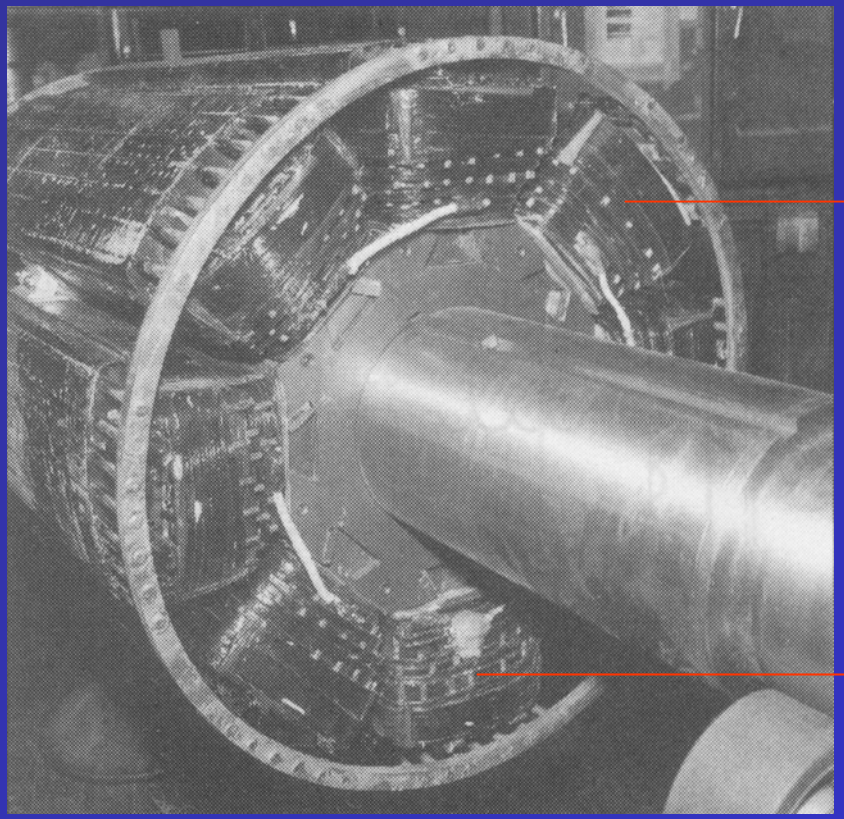
โครงสร้าง

โรเตอร์: แบบขั้วยื่น ในรูปเป็นแบบ 6 ขั้ว

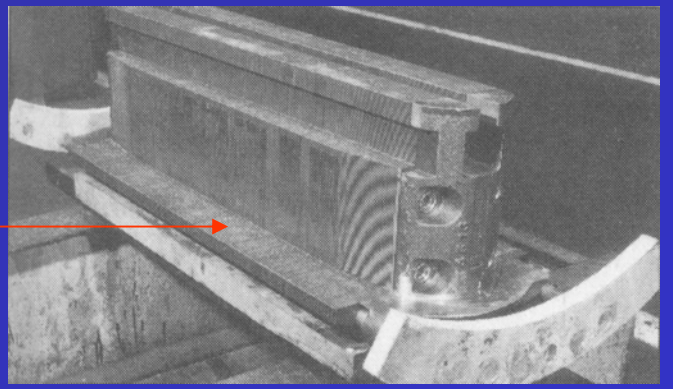


โครงสร้าง 6/12

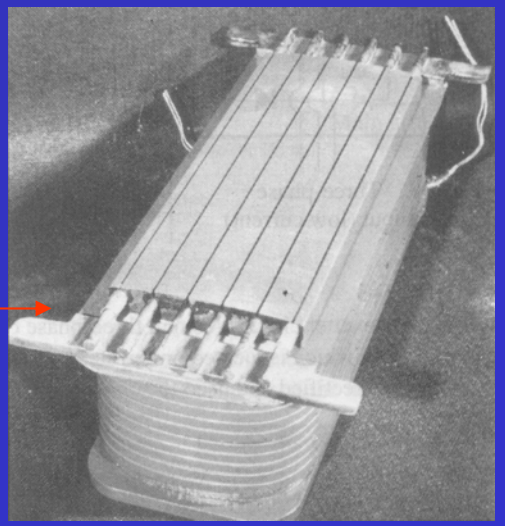
โรเตอร์: แบบขั้วยื่น ในรูปเป็นแบบ 8 ขั้ว



ขั้วยื่นก่อนพันขดลวดสนาม



ขั้วยื่นที่พันขดลวดสนามแล้ว



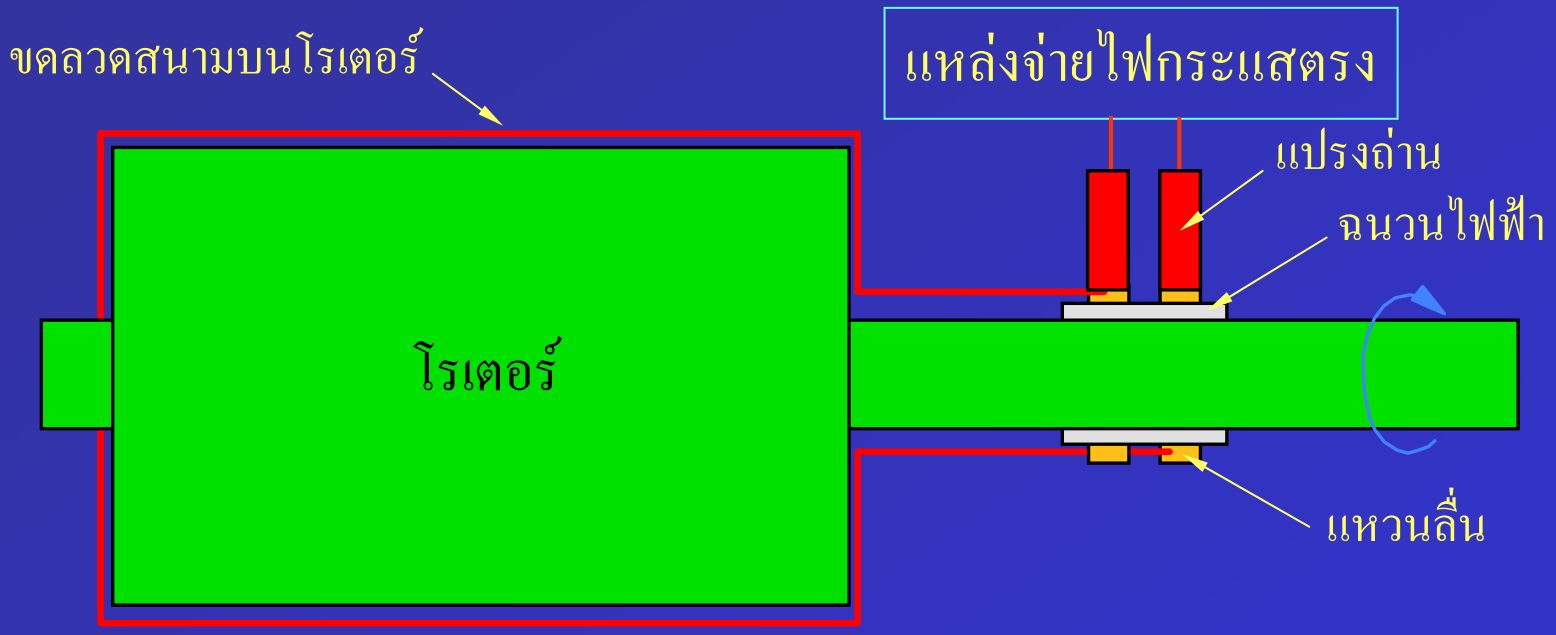
โครงสร้าง 7/12

วิธีป้อนกระแสสนาม

- ป้อนกระแสตรงผ่านแหวนลื่น (slip ring) และแปรงถ่าน (Brush)
- สร้างกระแสตรงด้วยอุปกรณ์ที่ติดตั้งบนเพลาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส (มักเรียกว่า Brushless exciter)

โครงสร้าง 8/12

วิธีป้อนกระแสตรงผ่านแหวนลื่น

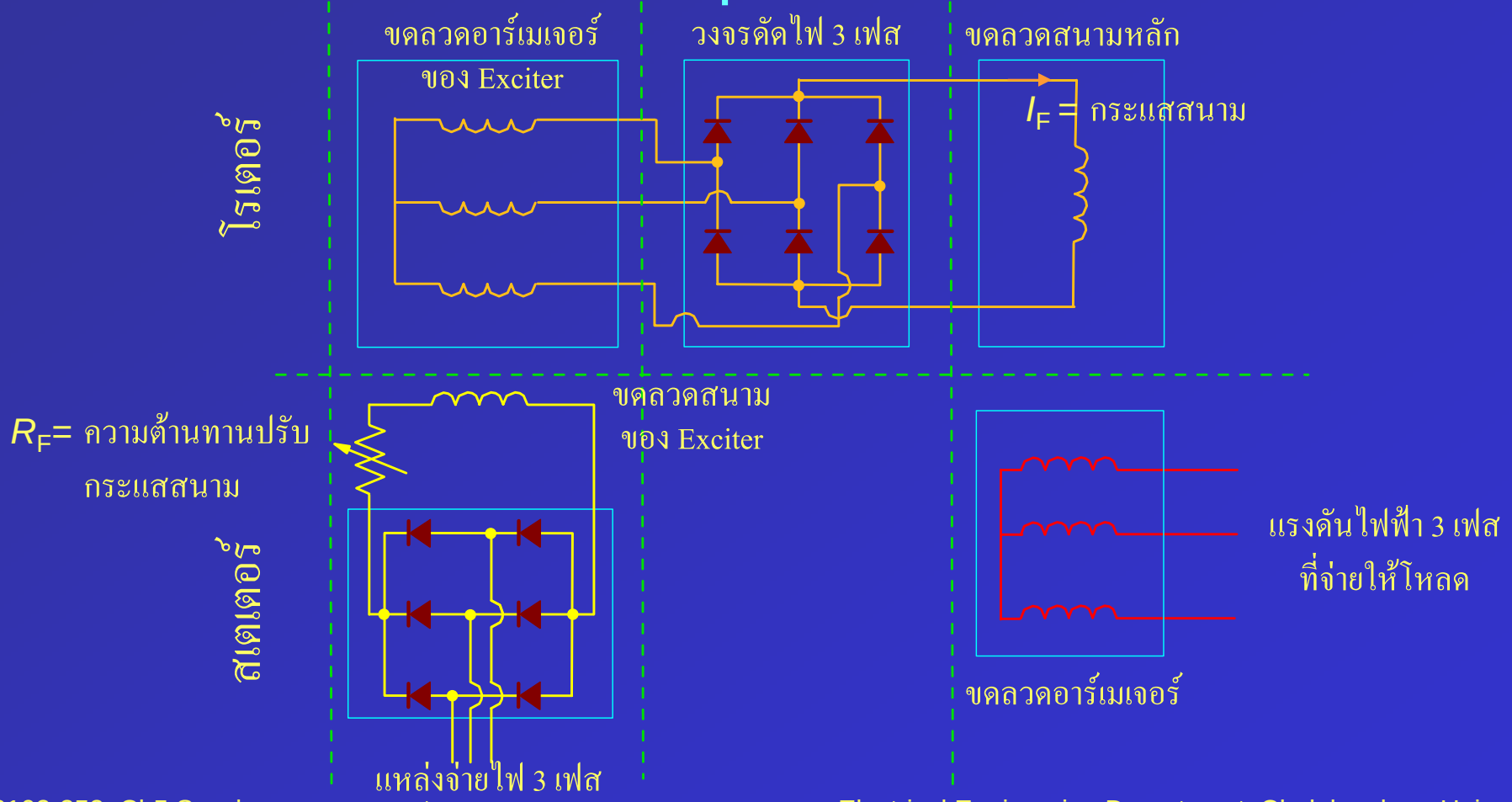


ข้อเสีย: แปรงถ่านสึกหรอทำให้ต้องมีการบำรุงรักษาและมีกำลังสูญเสียที่แปรงถ่าน

ข้อดี: ราคาไม่แพง จึงมักใช้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสขนาดเล็ก

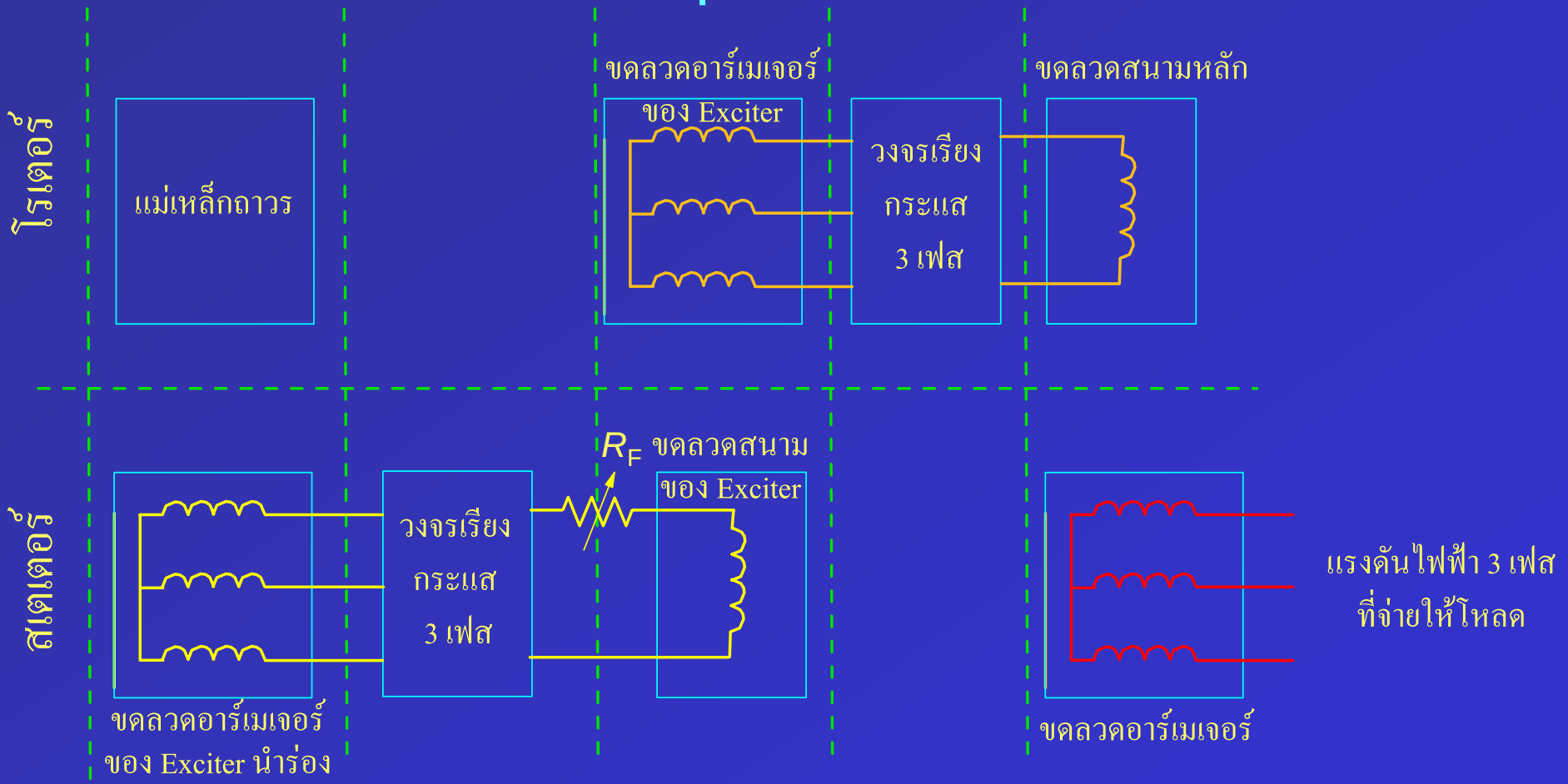
โครงสร้าง

วิธีสร้างกระแสตรงด้วยอุปกรณ์ที่ติดตั้งบนเพลา #1



โครงสร้าง 10/12

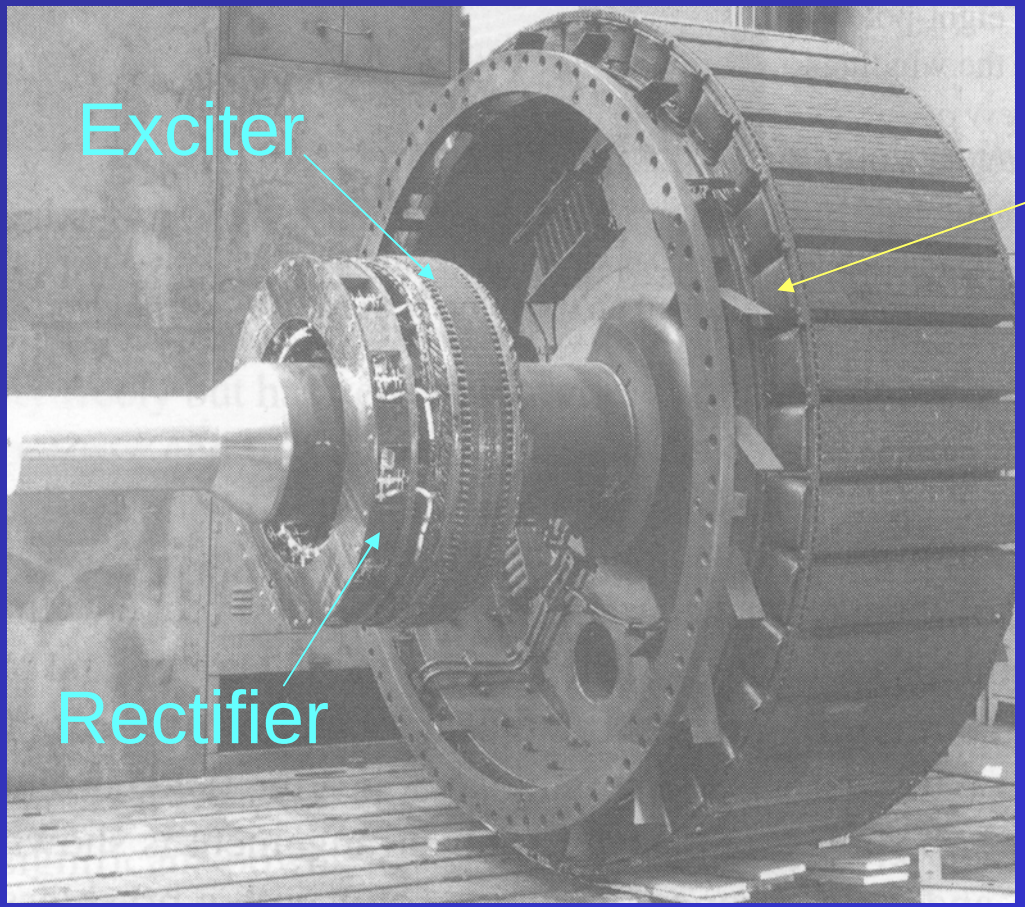
วิธีสร้างกระแสตรงด้วยอุปกรณ์ที่ติดตั้งบนเพลา #2



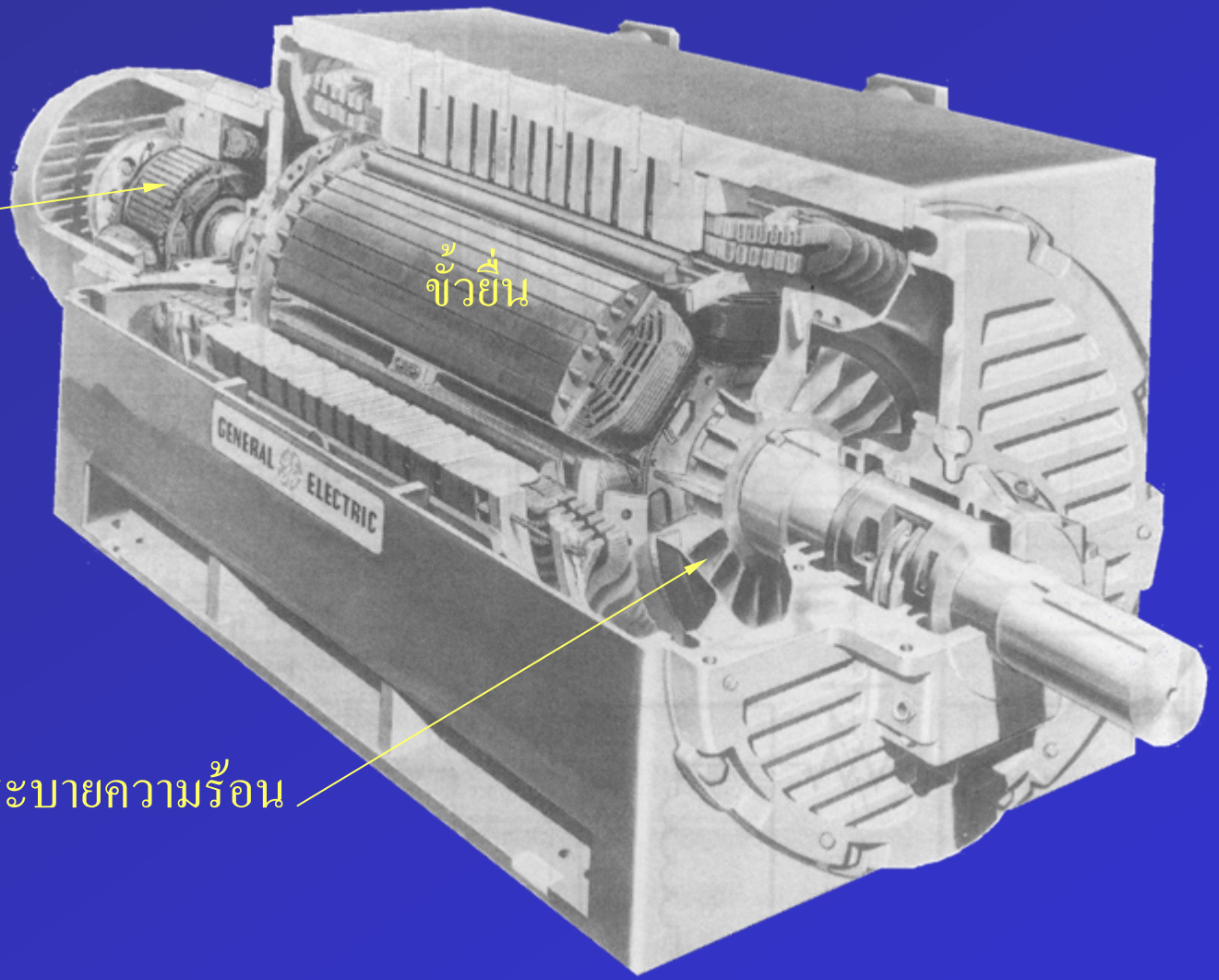
โครงสร้าง 11/12

วิธีสร้างกระแสตรงด้วยอุปกรณ์ที่ติดตั้งบนเพลา #3

ข้อสังเกต: Brushless exciter มักติดตั้งแหวนลื่นและแปรงถ่านไว้ในกรณีที่อาจเกิดเหตุฉุกเฉิน



โครงสร้าง 12/12



หลักการทำงาน 1/5

- *ซิงโครนัส* หมายถึงการที่ความถี่ของแรงดันไฟฟ้า, f_e , ที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายให้โหลดขึ้นกับความเร็วทางกลของโรเตอร์, n_m , กล่าวคือ

(ความเร็วโรเตอร์= ความเร็วซิงโครนัส)

$$f_e = \frac{n_m P}{120} \quad \Rightarrow \quad n_m = \frac{120 f_e}{P}$$

เมื่อ f_e = ความถี่ของแรงดันไฟฟ้า, Hz

n_m = ความเร็วทางกลของโรเตอร์, รอบต่อนาที (RPM)

P = จำนวนขั้ว

หลักการทำงาน 2/5

- แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ, E_A จากบทที่ 4

$$E_A = \sqrt{2}\pi N_C \phi f_e = \frac{2}{\sqrt{2}}\pi f_e N_C \phi = \frac{N_C}{\sqrt{2}}\phi\omega_e$$

$$E_A = K\phi\omega_e = \frac{KP}{2}\phi\omega_m \quad [\mathrm{V_{rms}}]$$

ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าขณะที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานขนาดของ E_A จะขึ้นกับฟลักซ์ ϕ และความเร็วของโรเตอร์ ω_m เท่านั้น (K เป็นค่าคงที่)

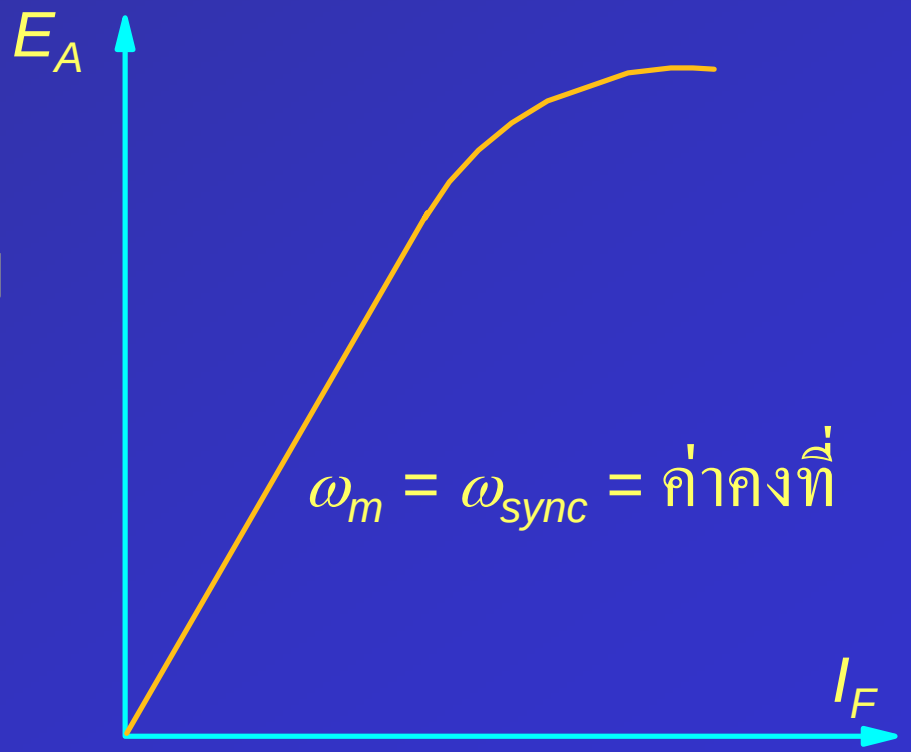
หลักการทำงาน 3/5

- *Magnetization curve* (*O/C characteristic curve*)

แต่ฟลักซ์ ϕ มีความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นกับกระแสสนาม I_f เนื่องจากการอิ่มตัวของแกนเหล็ก ดังนั้น

$$E_A = f(I_F)$$

จึงอาจมีลักษณะดังรูป



หลักการทำงาน 4/5

Ex.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าของโรงจักรไฟฟ้าพลังน้ำที่เขื่อนภูมิพลหมุนด้วยความเร็ว 300 RPM จงหาจำนวนขั้วของโรเตอร์ (ประเทศไทยใช้ความถี่ 50 Hz)

$$f_e = \frac{n_m P}{120} \quad \Rightarrow \quad P = \frac{120 f_e}{n_m}$$

$$P = \frac{120 \cdot 50}{300} = 20$$

หลักการทำงาน 4/5

Ex.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าของโรงจักรไฟฟ้าพลังงานความร้อนที่ปั่นปะกงหมุนด้วยความเร็ว 1500 RPM จงหาจำนวนขั้วของโรเตอร์ (ประเทศไทยใช้ความถี่ 50 Hz)

$$f_e = \frac{n_m P}{120} \quad \Rightarrow \quad P = \frac{120 f_e}{n_m}$$

$$P = \frac{120 \cdot 50}{1500} = 4$$

วงจรสมมูล 1/14

- E_A ที่กล่าวเป็นแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นภายในขดลวดอาร์เมเจอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
- แรงดันที่ขั้วขดลวดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า V_ϕ อาจมีค่าสูงหรือต่ำกว่า E_A ได้ ขึ้นอยู่กับประเภทโหลดที่ต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
- เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่มีโหลดเท่านั้น (กระแสอาร์เมเจอร์ $I_A = 0$) ที่ $E_A = V_\phi$ ทำไม???

วงจรสมมูล 2/14

สาเหตุที่ $V_\phi \neq E_A$

1. อาร์เมเจอร์รีแอกชัน (armature reaction)
2. ความเหนี่ยวนำรั่วไหลของขดลวดอาร์เมเจอร์
3. ความต้านทานของขดลวดอาร์เมเจอร์
4. ลักษณะรูปร่างของโรเตอร์แบบขั้วยื่น (จะเรียนในวิชา Electrical Machines II)

วงจรสมมูล 3/14

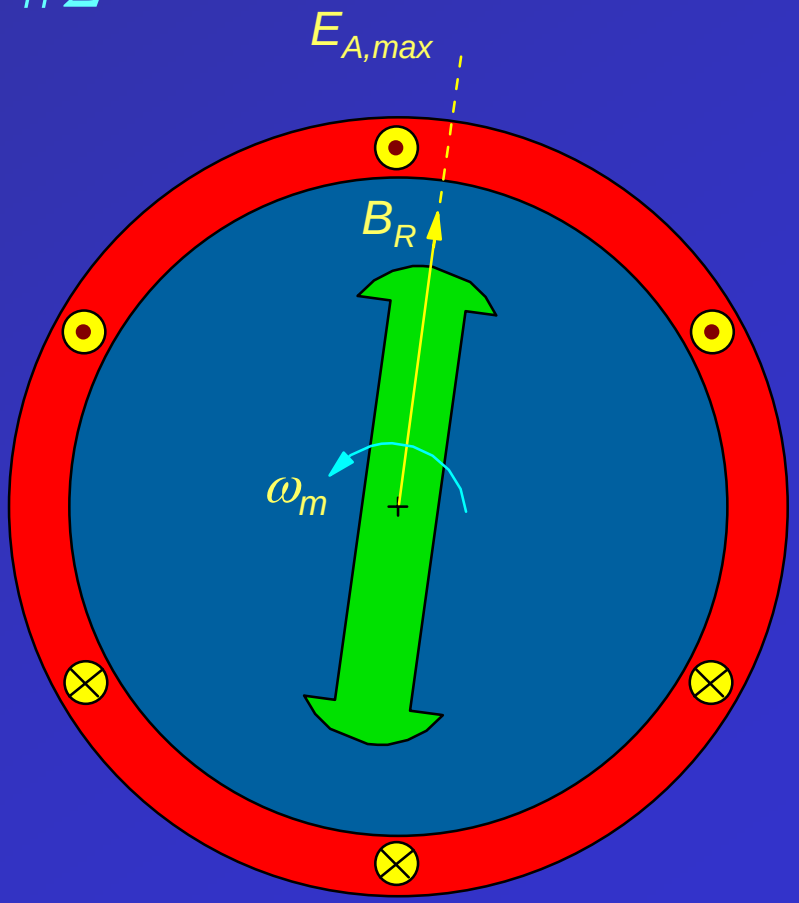
ผลของอาร์เมเจอร์รีแอกชัน #1

- เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายกระแสให้โหลด กระแสที่ไหลผ่านขดลวดอาร์เมเจอร์จะสร้างฟลักซ์ขึ้นมา ซึ่งจะไปเปลี่ยนแปลงการกระจายของ ฟลักซ์เดิมที่สร้างขึ้นจากขดลวดสนาม
- ในรูปถัดไปเป็นการอธิบายผลของอาร์เมเจอร์รีแอกชันโดยสมมุติว่าโรเตอร์มีสองขั้วและสเตเตอร์เป็นแบบสามเฟส

วงจรสมมูล 4/14

ผลของอาร์เมเจอร์รีแอกชัน #2

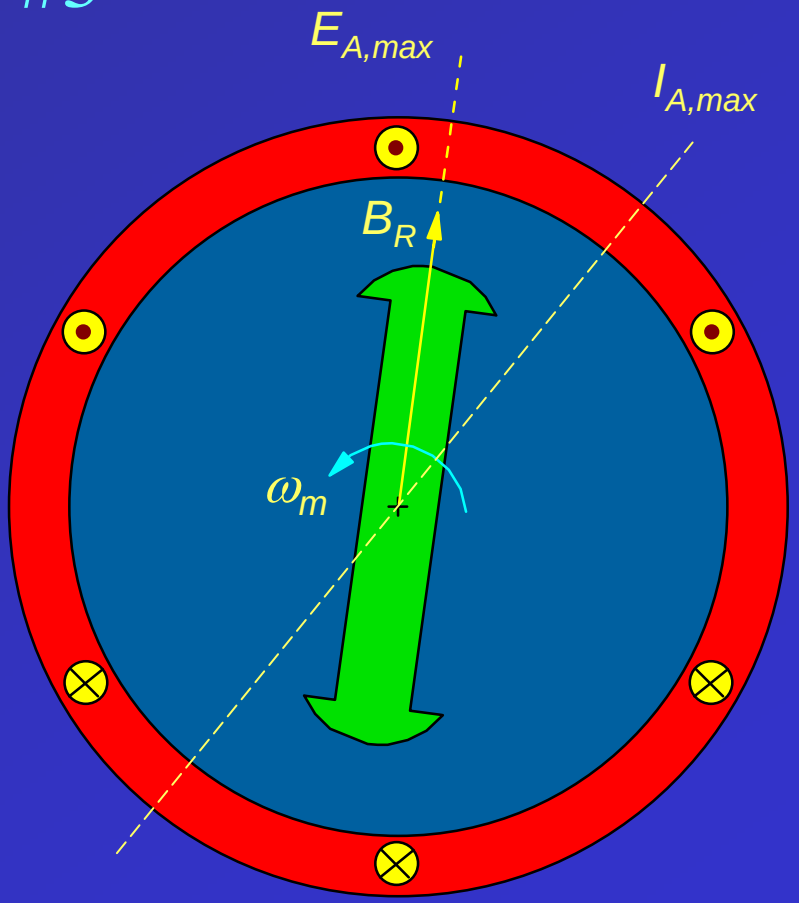
- พิจารณาขดลวดเฟส a ในภาวะที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าไร้โหลด สนามแม่เหล็กของโรเตอร์ B_R จะสร้างแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ E_A ในขดลวดอาร์เมเจอร์
- กำหนดให้ เวกเตอร์ B_R และ เฟสเซอร์ E_A ชี้ในแนวเดียวกัน



วงจรสมมูล

ผลของอาร์เมเจอร์รีแอกชัน #3

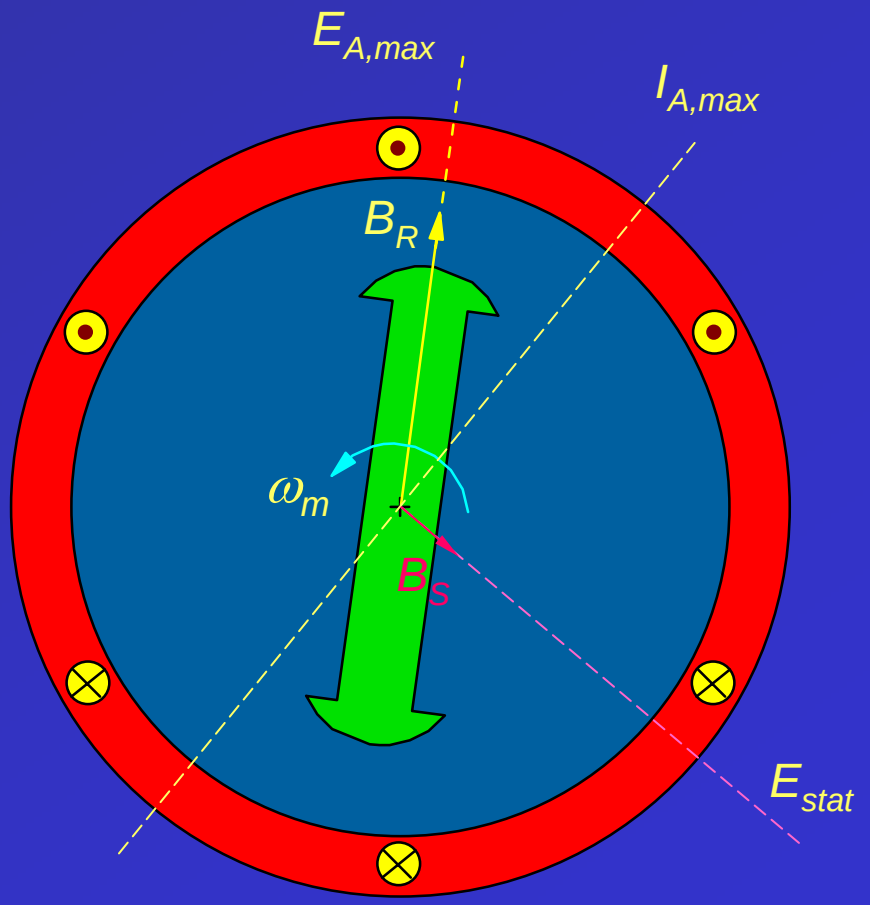
- สมมุติว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากำลังจ่ายโหลดแบบล้าหลัง (lagging PF, *R-L*, load)
- ค่ายอดและเฟสเซอร์ของกระแสอาร์เมเจอร์ I_A จะล้าหลังค่ายอดและเฟสเซอร์ของ E_A



วงจรสมมูล 6/14

ผลของอาร์เมเจอร์รีแอกชัน #4

- กระแสอาร์เมเจอร์ I_A จะสร้างสนามแม่เหล็กของตัวเอง B_S ขึ้นมา โดยเวกเตอร์ B_S จะล้าหลังเฟสเซอร์ของ I_A อยู่ 90 องศา
- B_S จะสร้างแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ E_{stat} ขึ้นในขดลวดอาร์เมเจอร์ โดยเฟสเซอร์ E_{stat} จะชี้ในแนวเดียวกับ B_S

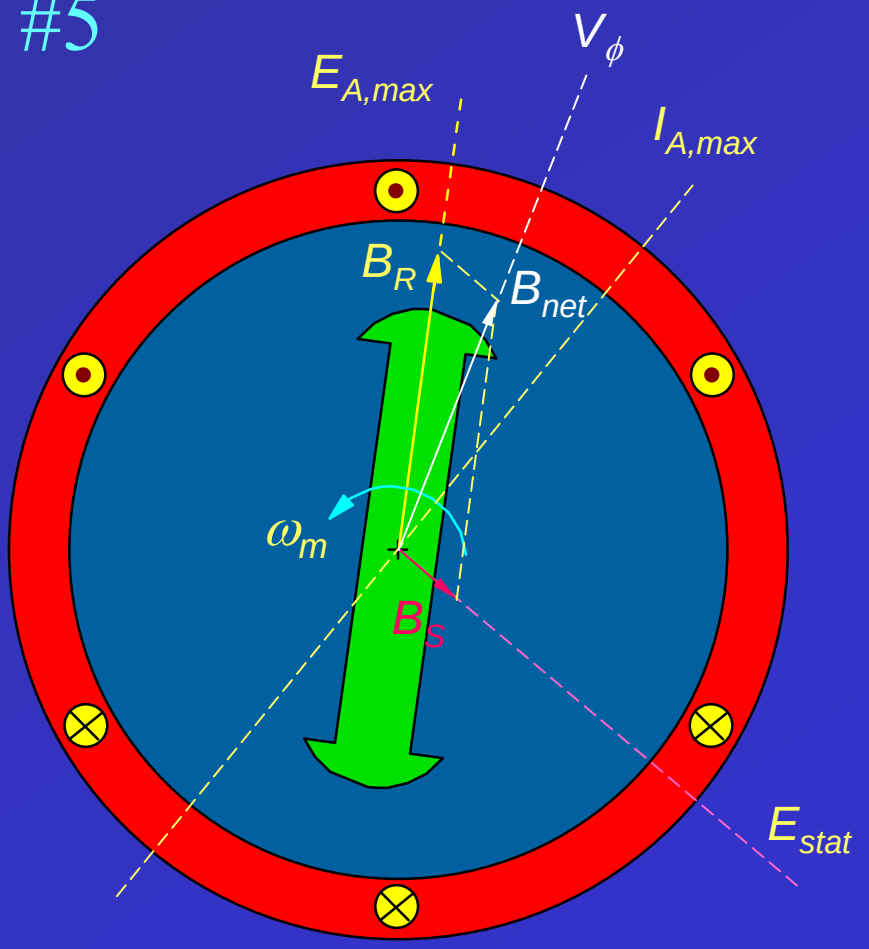


วงจรสมมูล

ผลของอาร์เมเจอร์รีแอกชัน #5

- ผลรวมของสนามแม่เหล็กที่โรเตอร์สร้างขึ้นและที่เกิดขึ้นเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายโหลดมีค่าเท่ากับ $B_{net} = B_R + B_S$
- แรงดันที่ขั้วขดลวดจึงมีค่าเป็น

$$V_\phi = E_A + E_{stat}$$



วงจรสมมูล 8/14

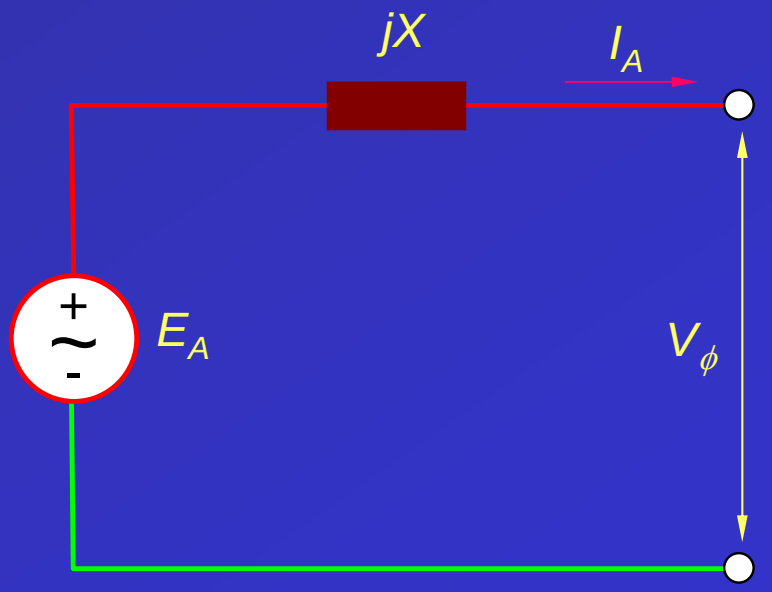
โมเดลที่แทนผลของอาร์เมเจอร์รีแอกชัน

- เราจะสังเกตได้ว่า E_{stat} ตามหลัง I_A อยู่ 90^o และขนาดของ E_{stat} แปรผันตามขนาดของ I_A
- ถ้าให้ X เป็นค่าคงที่ เราสามารถแสดงผลของอาร์เมเจอร์รีแอกชันทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$E_{stat} = -jXI_A$$

- แรงดันที่ขั้วขดลวดจึงมีค่าเป็น

$$V_\phi = E_A + E_{stat} = E_A - jXI_A$$

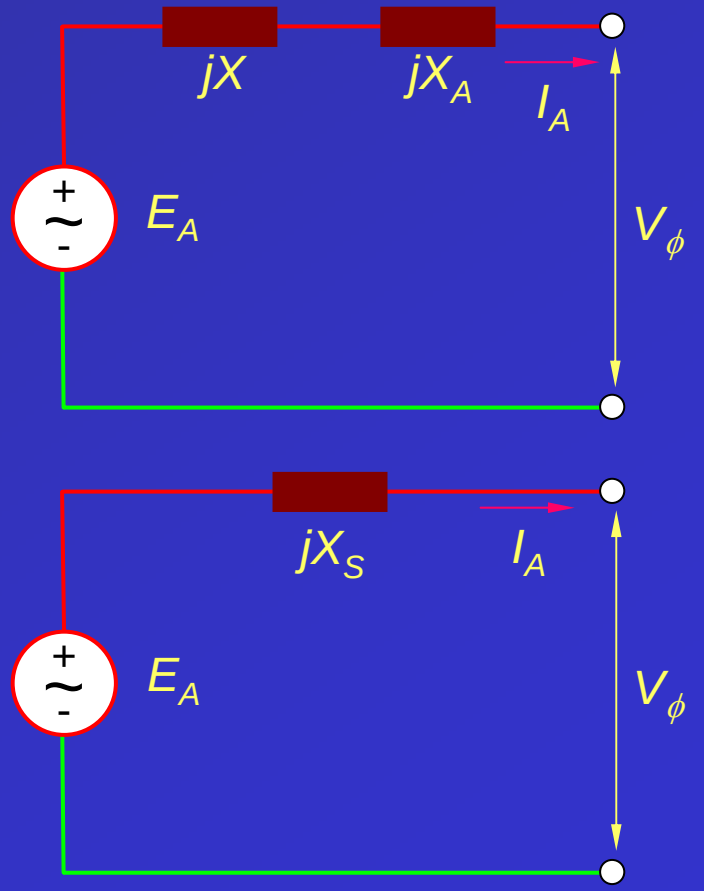


วงจรสมมูล 9/14

ผลของความเหนี่ยวนำรั่วไหลของขดลวดอาร์เมเจอร์

- การพันขดลวดอาร์เมเจอร์บนสเตเตอร์จะทำให้เกิดความเหนี่ยวนำรั่วไหล X_A ด้วย
- แรงดันที่ขั้วขดลวดจึงมีค่าเป็น

$$V_\phi = E_A - jXI_A - jX_AI_A$$
$$= E_A - j(X + X_A)I_A$$
$$= E_A - jX_SI_A$$

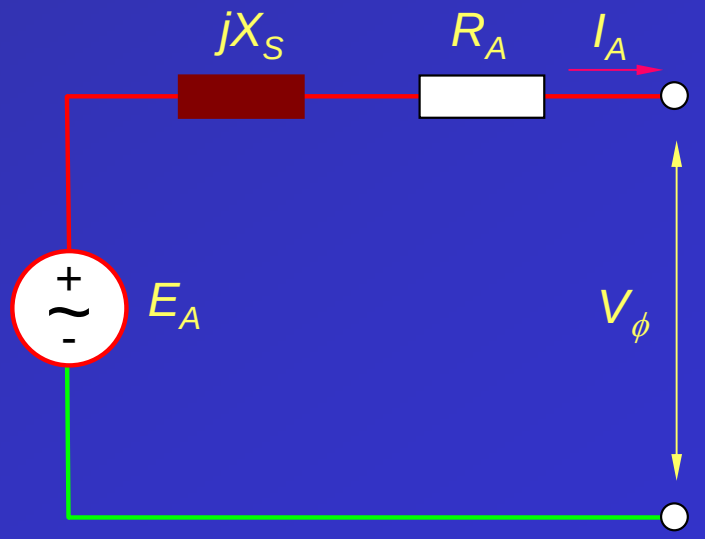


วงจรสมมูล 10/14

ผลของความต้านทานของขดลวดอาร์เมเจอร์

- ขดลวดอาร์เมเจอร์ปกติจะทำจากทองแดง ดังนั้นจึงมีความต้านทาน R_A อยู่ด้วย
- แรงดันที่ขั้วขดลวดจึงมีค่าเป็น

$$V_\phi = E_A - jX_S I_A - R_A I_A$$
$$= E_A - Z_S I_A$$



X_S : *Synchronous reactance*

Z_S : *Synchronous impedance*

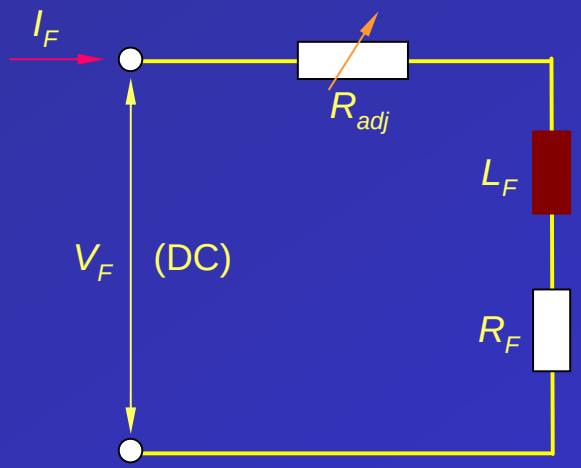
E_A : *Internal induced voltage*

V_ϕ : *Terminal voltage*

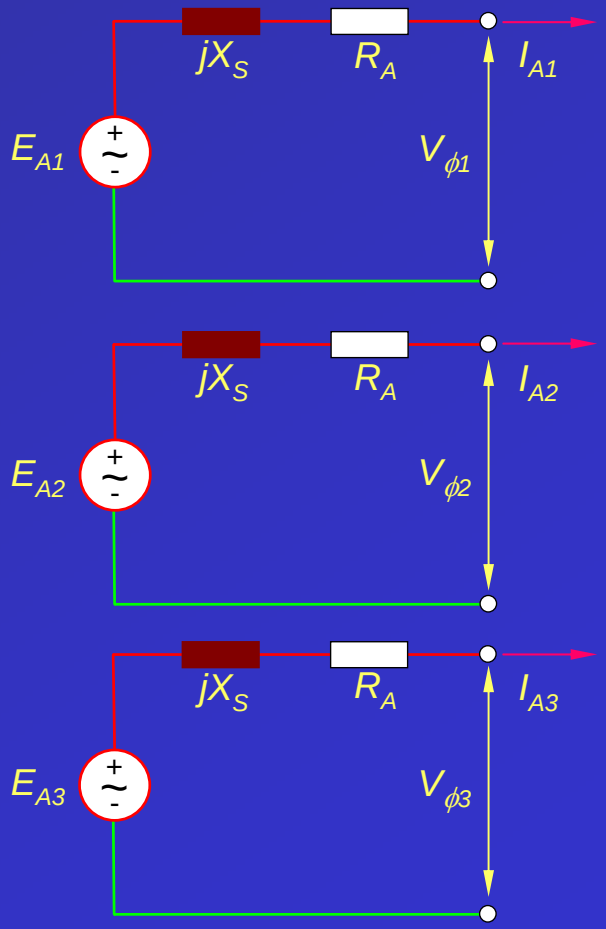
วงจรสมมูล 11/14

วงจรสมมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ 3 เฟส

R_{adj} ทำหน้าที่อะไร?



แรงดัน E_{A1}, E_{A2} และ E_{A3} มีเฟสต่างกัน 120° ทางไฟฟ้า

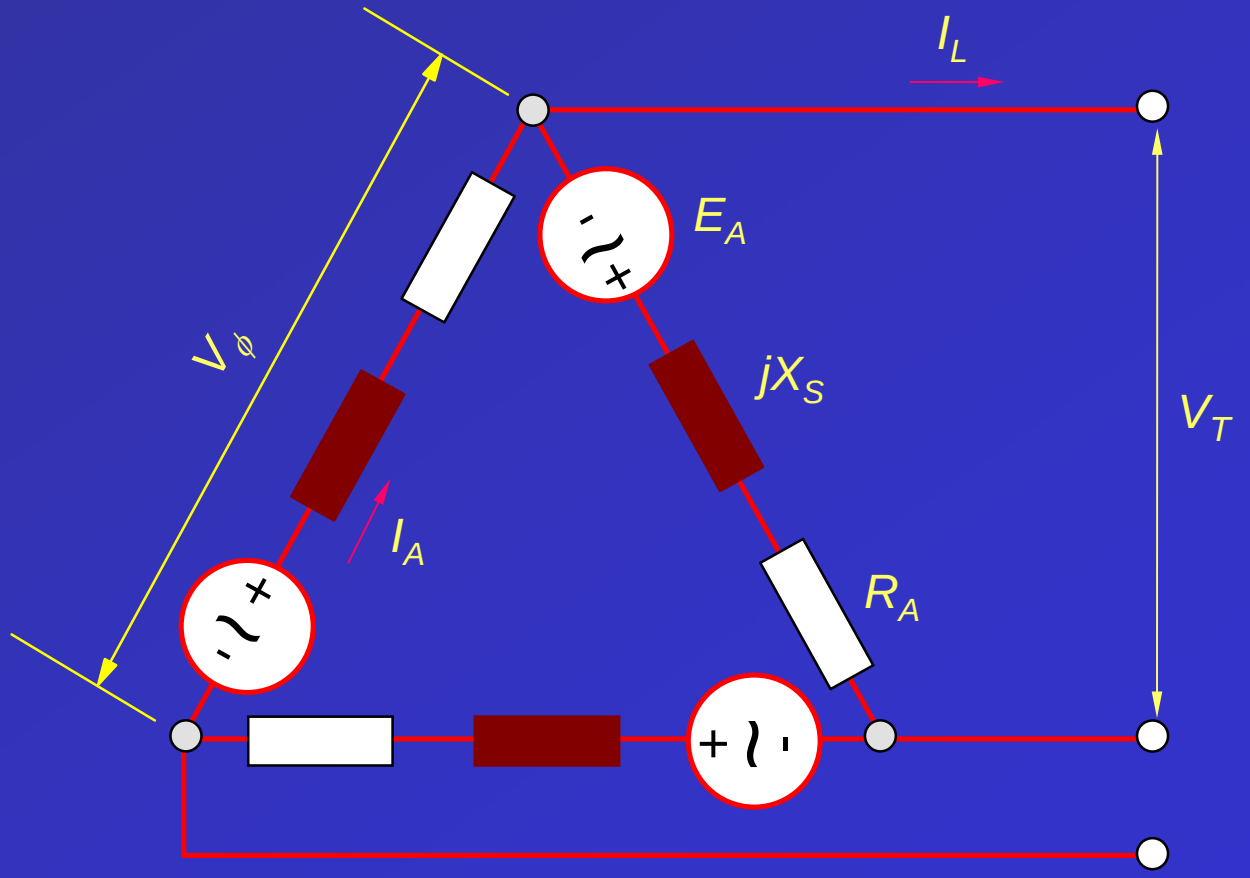


วงจรสมมูล 12/14

การต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 3 เฟสแบบ Δ

$$V_T = V_\phi$$

$$I_L = \sqrt{3} I_A$$

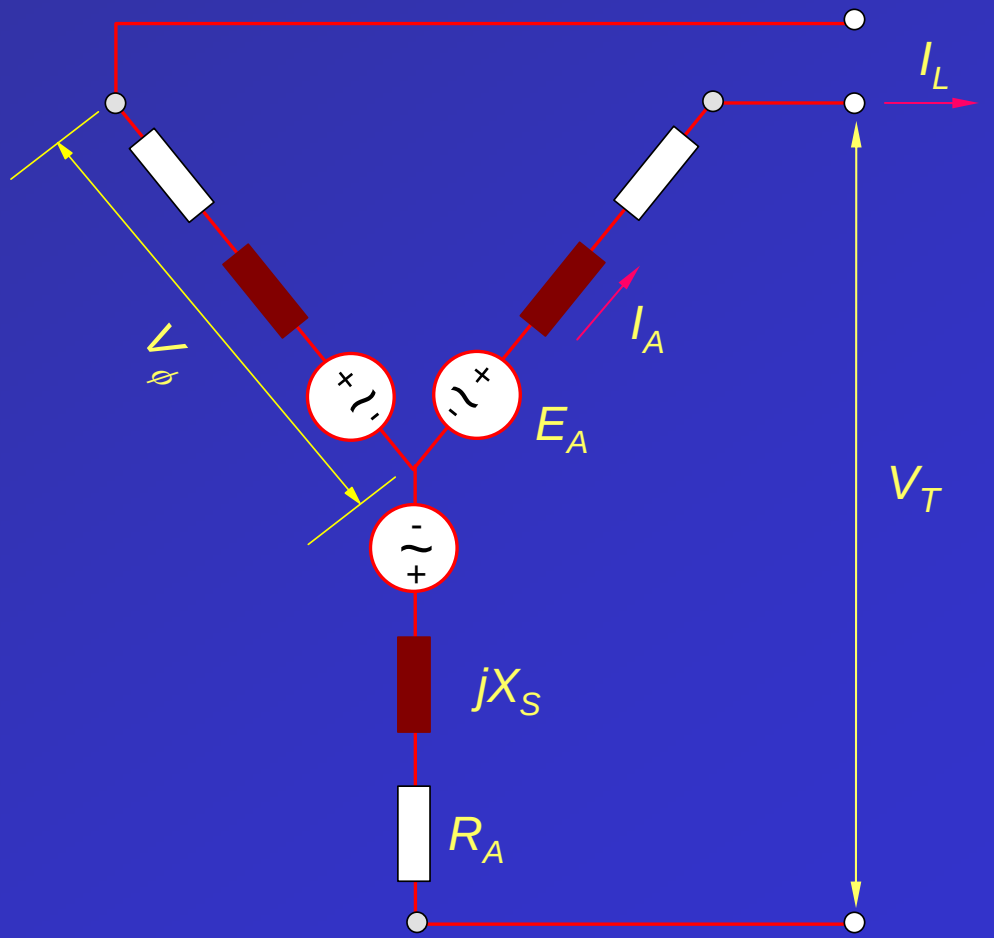


วงจรสมมูล

การต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 3 เฟสแบบ Y

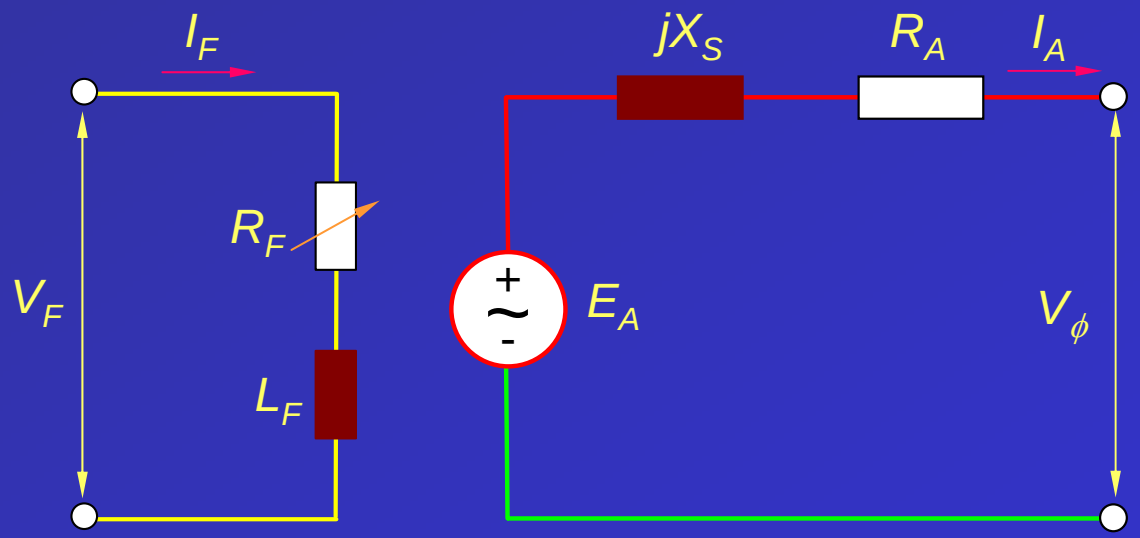
$$V_T = \sqrt{3} V_\phi$$

$$I_L = I_A$$



วงจรสมมูล 14/14

วงจรสมมูลทั่วไปของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

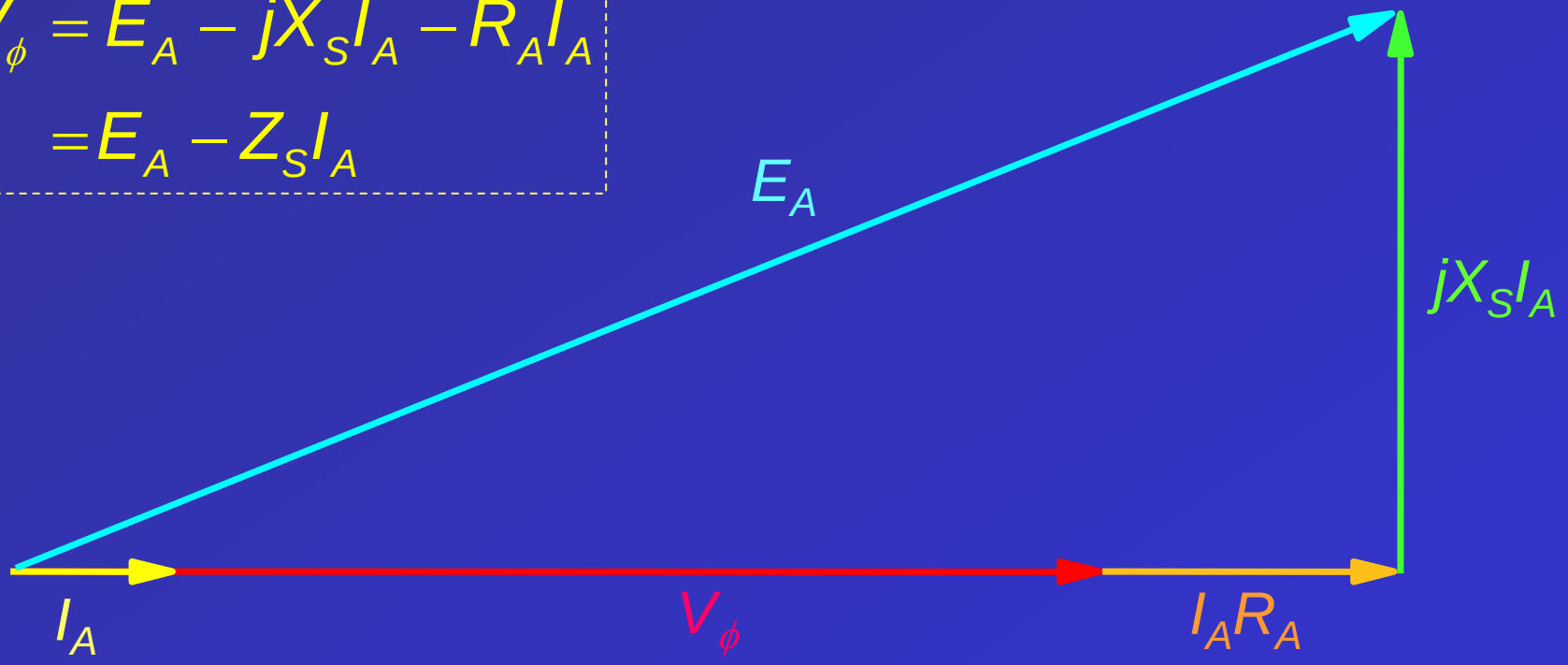


วงจรนี้ใช้ได้เฉพาะในกรณีที่โหลดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นแบบสมดุล
(ขนาดของ $I_{A1} = I_{A2} = I_{A3}$ และมีเฟสต่างกัน 120^o ทางไฟฟ้า)

แผนภาพเฟสเซอร์ 1/3

โหลดแบบตัวต้านทาน (PF = 1)

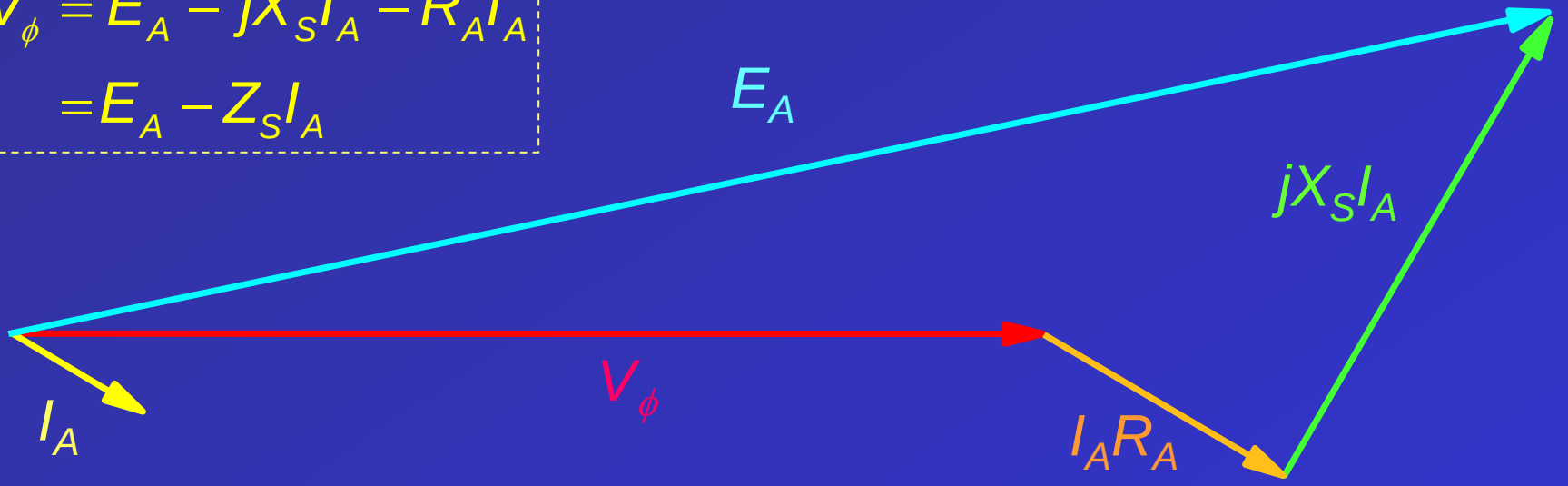
$$V_\phi = E_A - jX_S I_A - R_A I_A$$
$$= E_A - Z_S I_A$$



แผนภาพเฟสเซอร์ 2/3

โหลดแบบล้าหลัง (PF < 1, lagging)

$$V_\phi = E_A - jX_S I_A - R_A I_A$$
$$= E_A - Z_S I_A$$

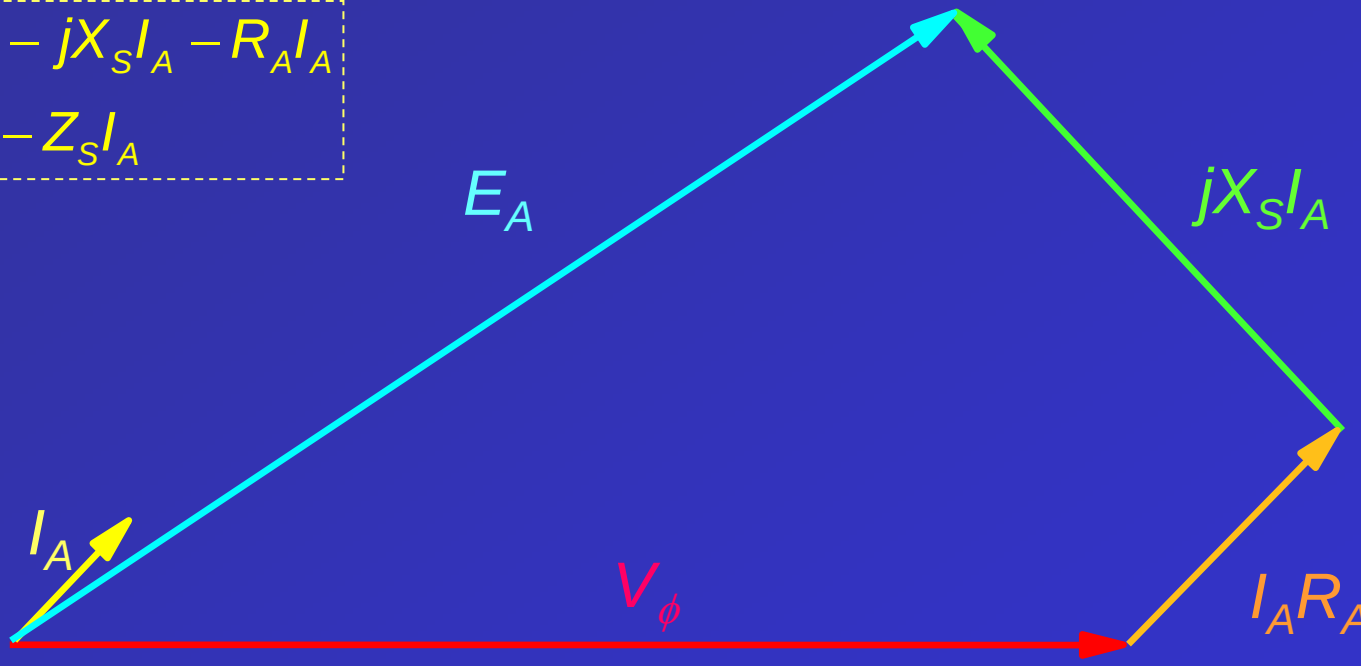


เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายกระแสให้โหลดที่แรงดัน V_ϕ เท่ากันกับในกรณีที่โหลดเป็นตัวต้านทาน เราต้องเพิ่ม E_A (เพิ่ม I_F)

แผนภาพเฟสเซอร์ 3/3

โหลดแบบนำหน้า (PF < 1, leading)

$$V_\phi = E_A - jX_S I_A - R_A I_A$$
$$= E_A - Z_S I_A$$

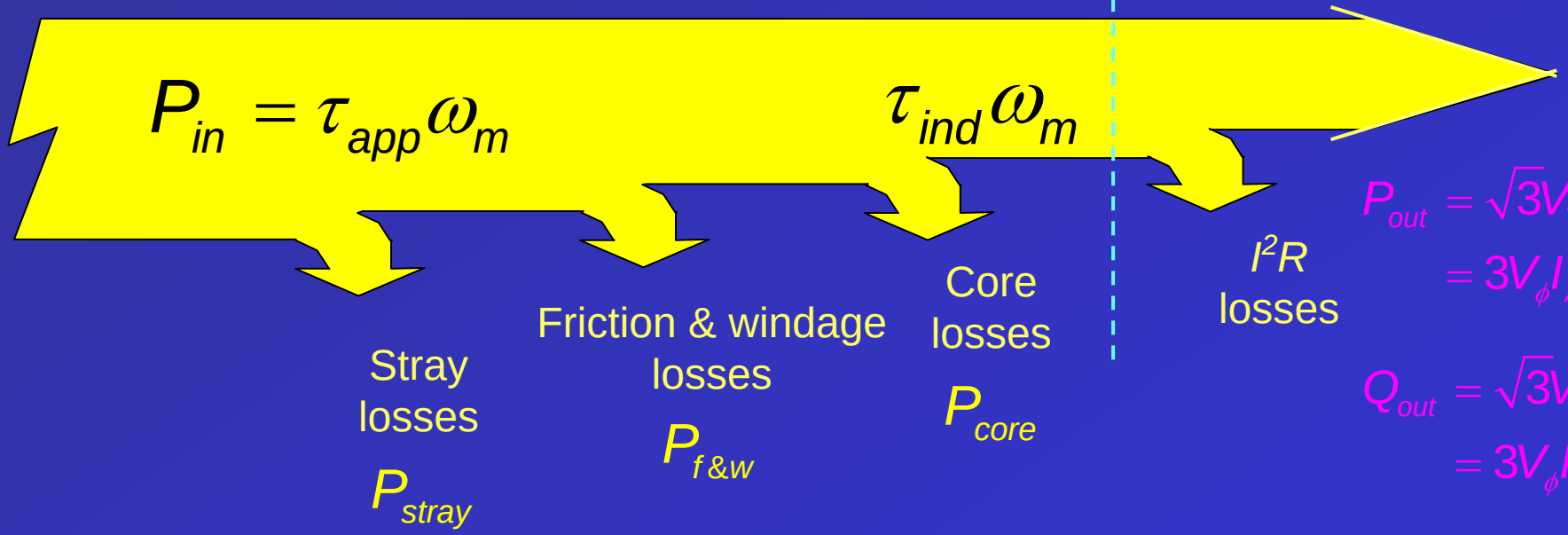


เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายกระแสให้โหลดที่แรงดัน V_ϕ เท่ากันกับในกรณีที่โหลดเป็นตัวต้านทาน เราต้องลด E_A (ลด I_F)

กำลังและแรงบิด 1/4

กำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$$P_{conv} = \tau_{ind}\omega_m = 3E_A I_A \cos\gamma$$

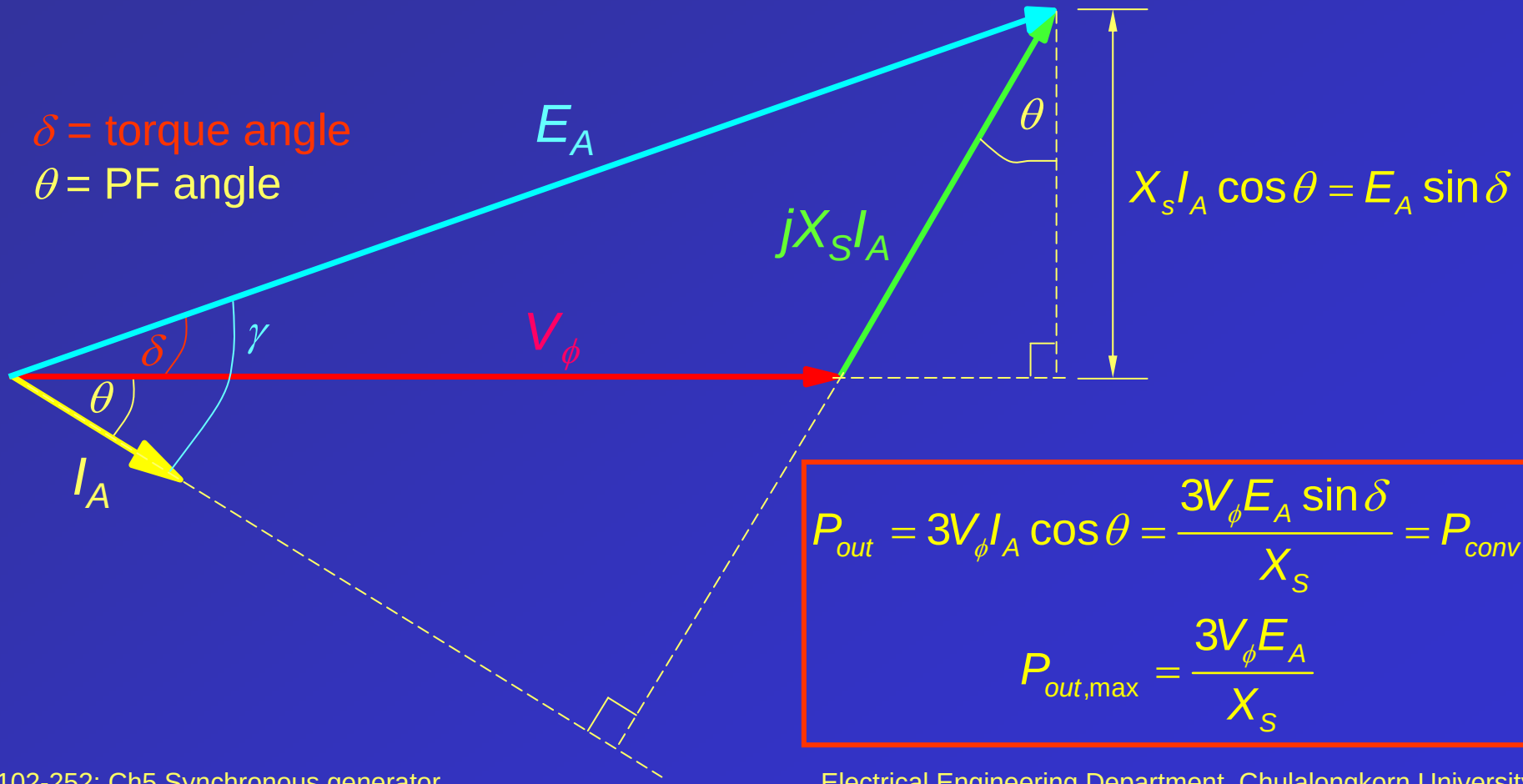


$$P_{out} = \sqrt{3}V_T I_L \cos\theta = 3V_\phi I_A \cos\theta$$

$$Q_{out} = \sqrt{3}V_T I_L \sin\theta = 3V_\phi I_A \sin\theta$$

กำลังและแรงบิด 2/4

กำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อละเลย R_A



$$P_{out} = 3V_\phi I_A \cos\theta = \frac{3V_\phi E_A \sin\delta}{X_S} = P_{conv}$$

$$P_{out,\max} = \frac{3V_\phi E_A}{X_S}$$

กำลังและแรงบิด 3/4

กำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อละเลย R_A

- กำลังไฟฟ้า $P_{out,\max}$ เรียกว่า static stability limit ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
- ในภาวะปกติที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายโหลดเต็มพิกัด torque angle จะมีค่าประมาณ 15° - 20°
- โดยปกติโหลดต้องการแรงดัน V_ϕ คงที่ ดังนั้น P_{out} จึงขึ้นกับ $I_A \cos\theta$ หรือ $E_A \sin\delta$
- Q_{out} จึงขึ้นกับ $I_A \sin\theta$

กำลังและแรงบิด 4/4

แรงบิดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อละเลย R_A

- จากบทที่ 4 เราได้ทราบว่า

$$\tau_{ind} = k\vec{B}_R \times \vec{B}_S = k\vec{B}_R \times \vec{B}_{net}$$

ซึ่งมีขนาดเท่ากับ

$$\tau_{ind} = kB_R B_{net} \sin\delta$$

- จากสมการกำลัง

$$P_{conv} = \tau_{ind}\omega_m = \frac{3V_\phi E_A \sin\delta}{X_S} \Rightarrow \boxed{\tau_{ind} = \frac{3V_\phi E_A \sin\delta}{\omega_m X_S}}$$

การทดสอบ 1/18

- มีพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 3 ตัวที่เราต้องหาจากการทดสอบ คือ
  - ความสัมพันธ์ของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ E_A กับกระแสสนาม I_F
  - รีแอกแตนซ์ (synchronous reactance) X_S
  - ความต้านทานของขดลวดอาร์เมเจอร์ R_A

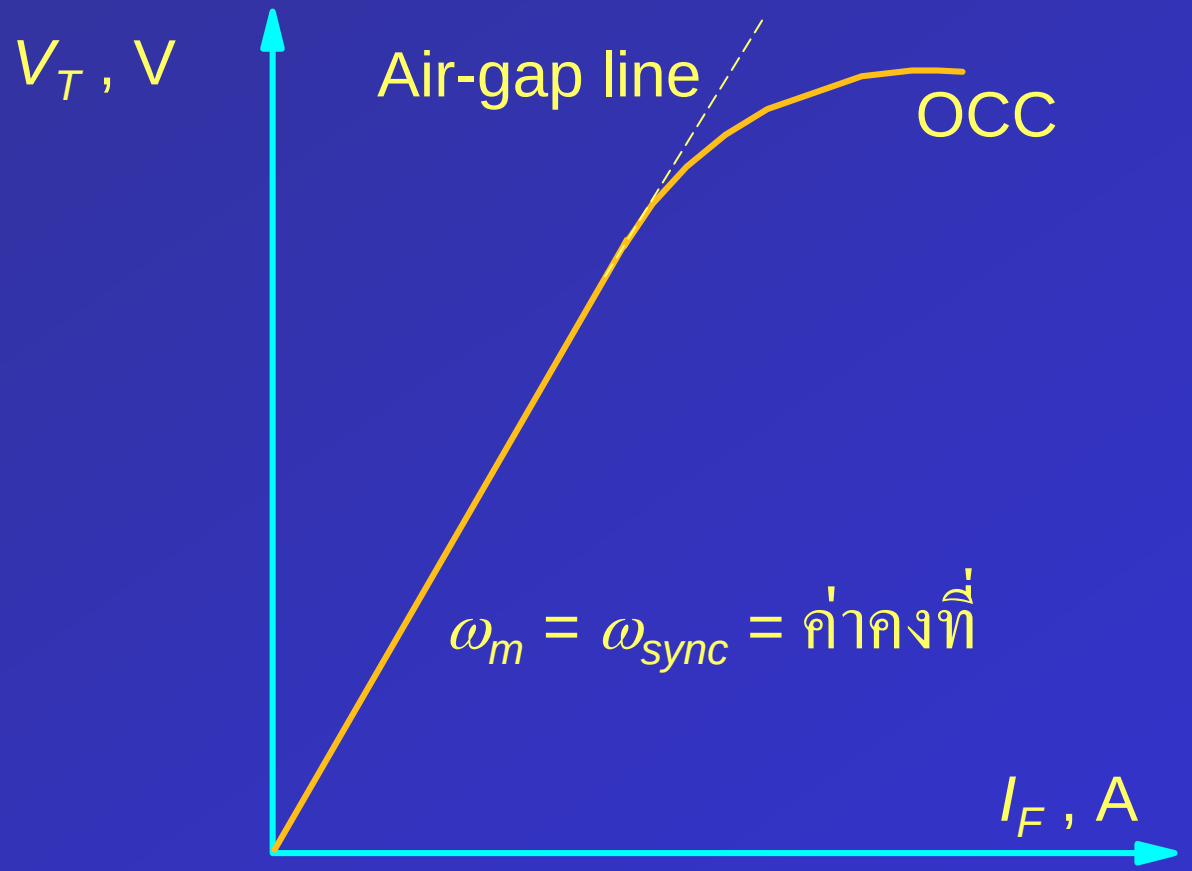
การทดสอบ 2/18

การทดสอบเปิดวงจร (O/C test)

- ปลดโหลดออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและปรับกระแสสนาม I_F ให้มีค่าเท่ากับศูนย์
- หมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ความเร็วพิกัด ω_m
- เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่มีโหลด กระแสอาร์เมเจอร์ I_A จึงเท่ากับศูนย์ ดังนั้น $E_A = V_\phi$
- ปรับกระแสสนาม I_F เป็นขั้นแล้ววัดค่า V_T

การทดสอบ 3/18

ลักษณะเฉพาะขณะเปิดวงจร (O/C characteristic, OCC)



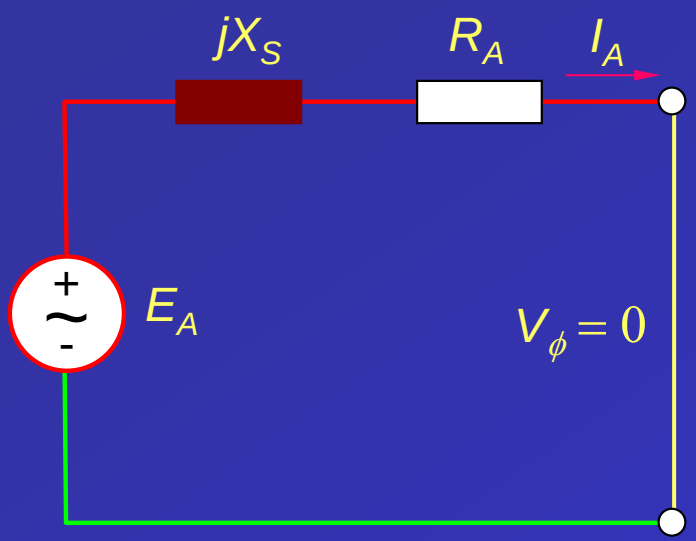
การทดสอบ 4/18

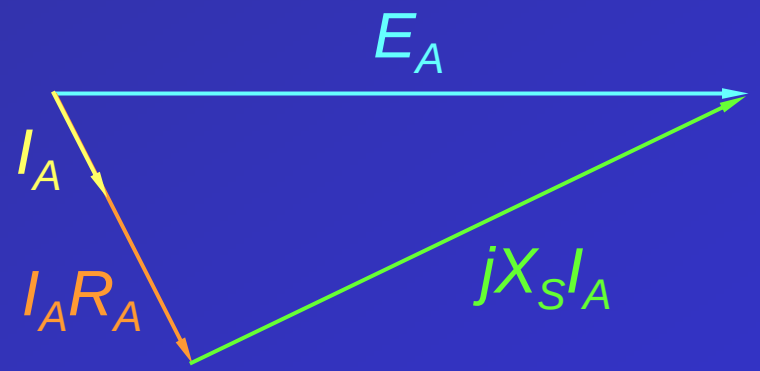
การทดสอบลัดวงจร (S/C test)

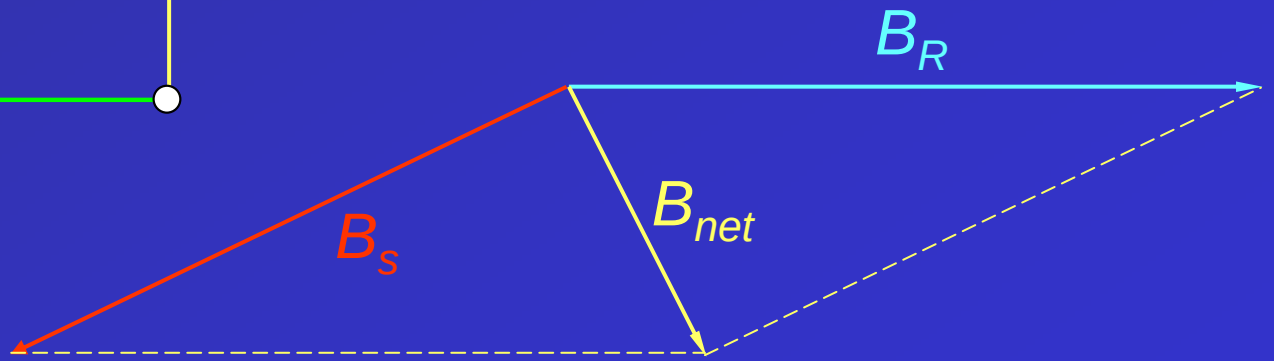
- ลัดวงจรขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าผ่านแอมป์มิเตอร์และปรับกระแสสนาม I_F ให้มีค่าเท่ากับศูนย์
- หมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ความเร็วพิกัด ω_m
- ปรับกระแสสนาม I_F เป็นขั้น แล้ววัดค่ากระแสอาร์เมเจอร์ I_A หรือกระแสโหลด I_L

การทดสอบ 5/18

การทดสอบลัดวงจร







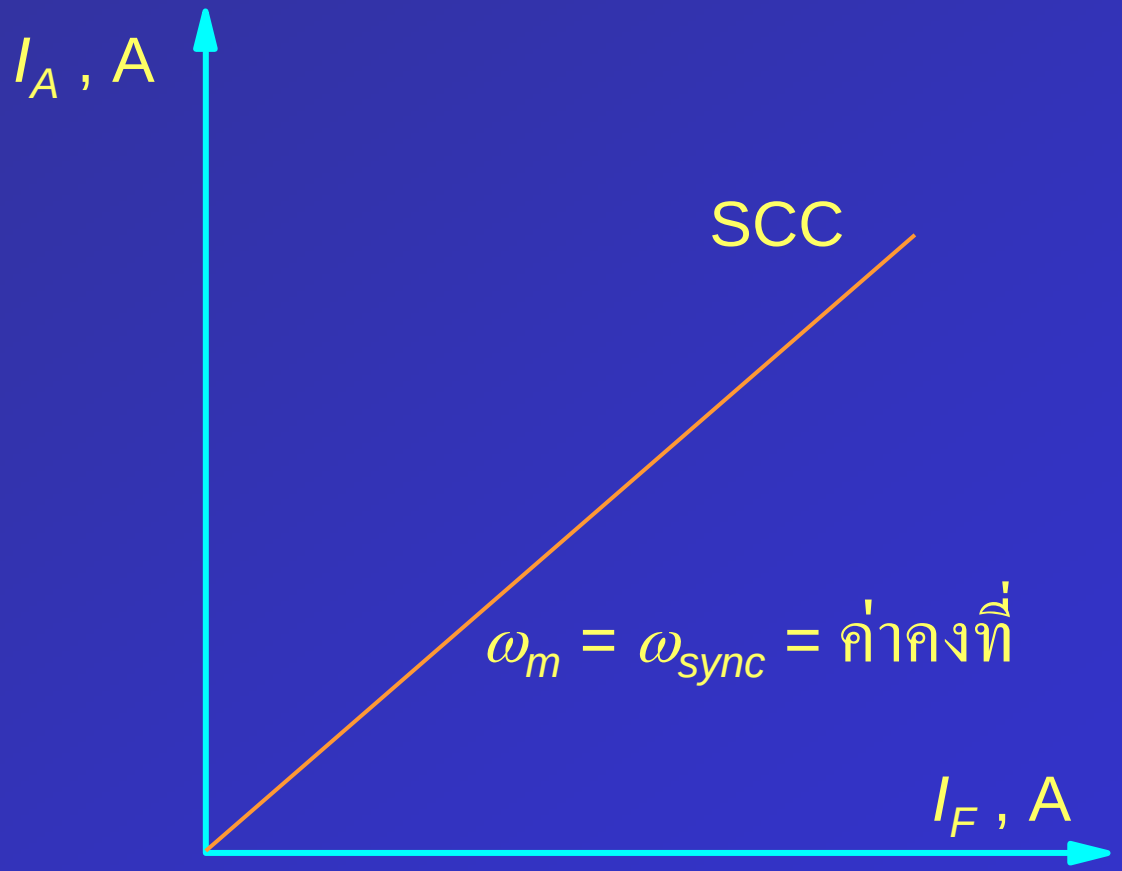
การทดสอบ 6/18

การทดสอบลัดวงจร

- เมื่อลัดวงจรขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า กระแสอาร์เมเจอร์ I_A เกือบจะตั้งฉากกับแรงดันเหนี่ยวนำ E_A (เพราะ $R_A << X_S$)
- ฟลักซ์ที่เกิดจากกระแสอาร์เมเจอร์ B_s จึงมีทิศเกือบตรงข้ามกับฟลักซ์ที่สร้างจากโรเตอร์ B_R ทำให้ B_{net} มีค่าน้อย
- แกนเหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจึงไม่อิ่มตัว

การทดสอบ 7/18

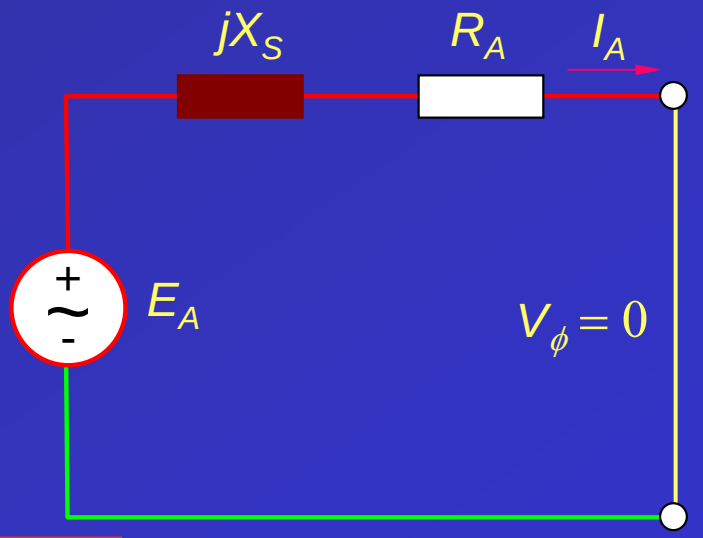
ลักษณะเฉพาะขณะลัดวงจร (S/C characteristic, SCC)



การทดสอบ 8/18

- จากวงจรสมมูลของการทดสอบลัดวงจรจะพบว่า

$$Z_s = \sqrt{R_A^2 + X_S^2} = \frac{E_{A,SC}}{I_{A,SC}}$$



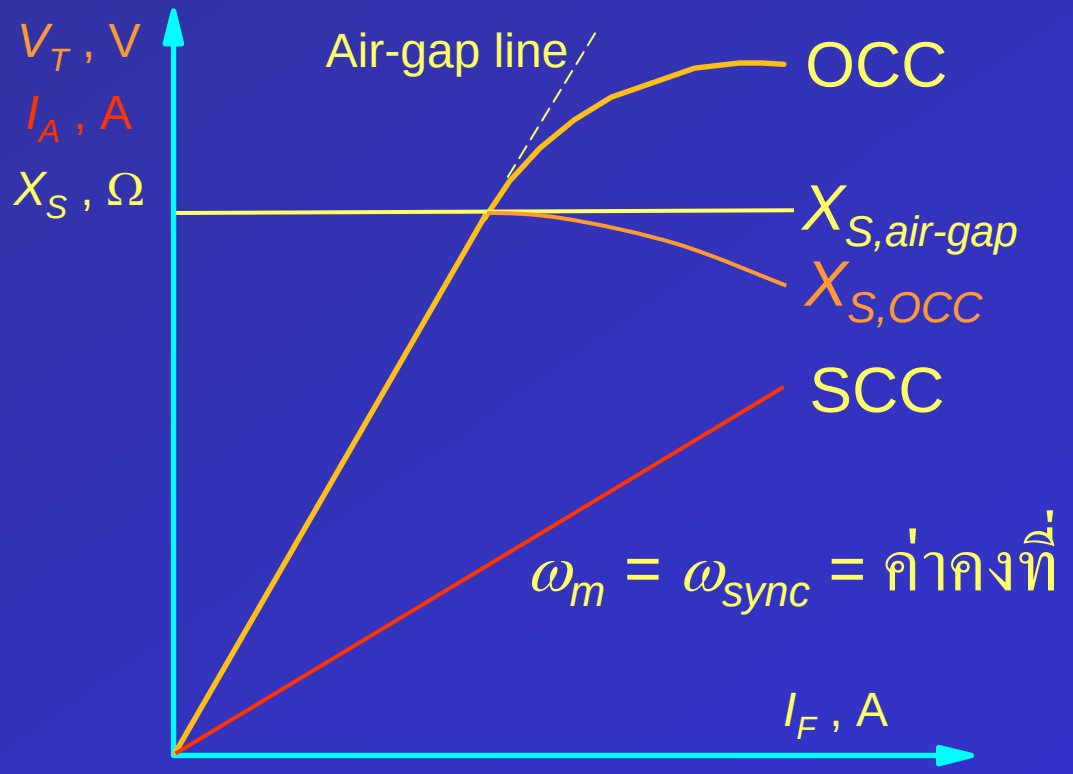
- แต่ $R_A \ll X_S$ และ $E_{A.SC} = V_{\phi,OC}$

$$X_s \approx \frac{E_{A,SC}}{I_{A,SC}} = \frac{V_{\phi,OC}}{I_{A,SC}} = \frac{V_{T,OC}/\sqrt{3}}{I_{A,SC}} \Bigg|_{at\ I_F}$$

- R_A หาได้จากการวัดความต้านทานของขดลวดอาร์เมเจอร์ด้วย Wheatstone bridge หรือเครื่องวัดความต้านทานอื่นที่เหมาะสม

การทดสอบ 9/18

- ค่า X_S มีค่าไม่คงที่เพราะ $V_{\phi,OC}$ เกิดการอิ่มตัว



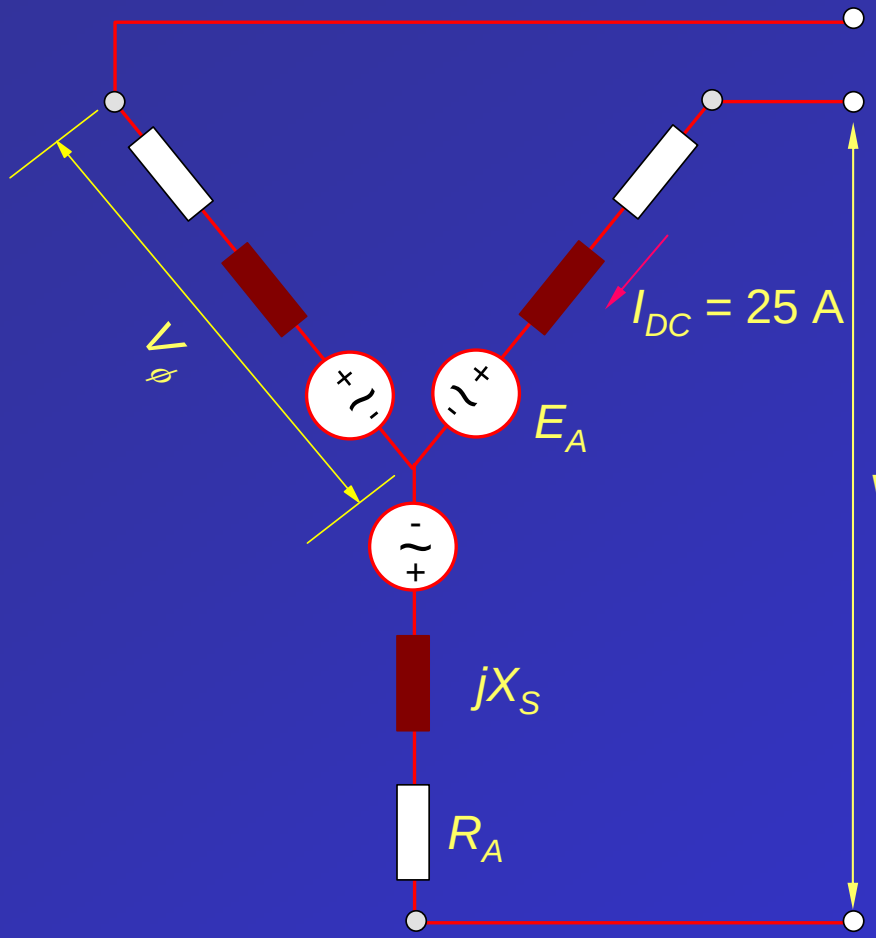
การทดสอบ 10/18

Ex.3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด 200 kVA 480 V 50 Hz ต่อแบบ Y มีผลการทดสอบเมื่อป้อนกระแสสนามพิกัดเท่ากับ 5 A ดังนี้

- แรงดันเปิดวงจร $V_{T,OC} = 540$ V
- กระแสลัดวงจร $I_{L,SC} = 300$ A
- เมื่อป้อนแรงดันกระแสตรงขนาด 10 V เข้าที่ขั้ว วัดกระแสได้ 25 A

จงหาค่า X_S และ R_A ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

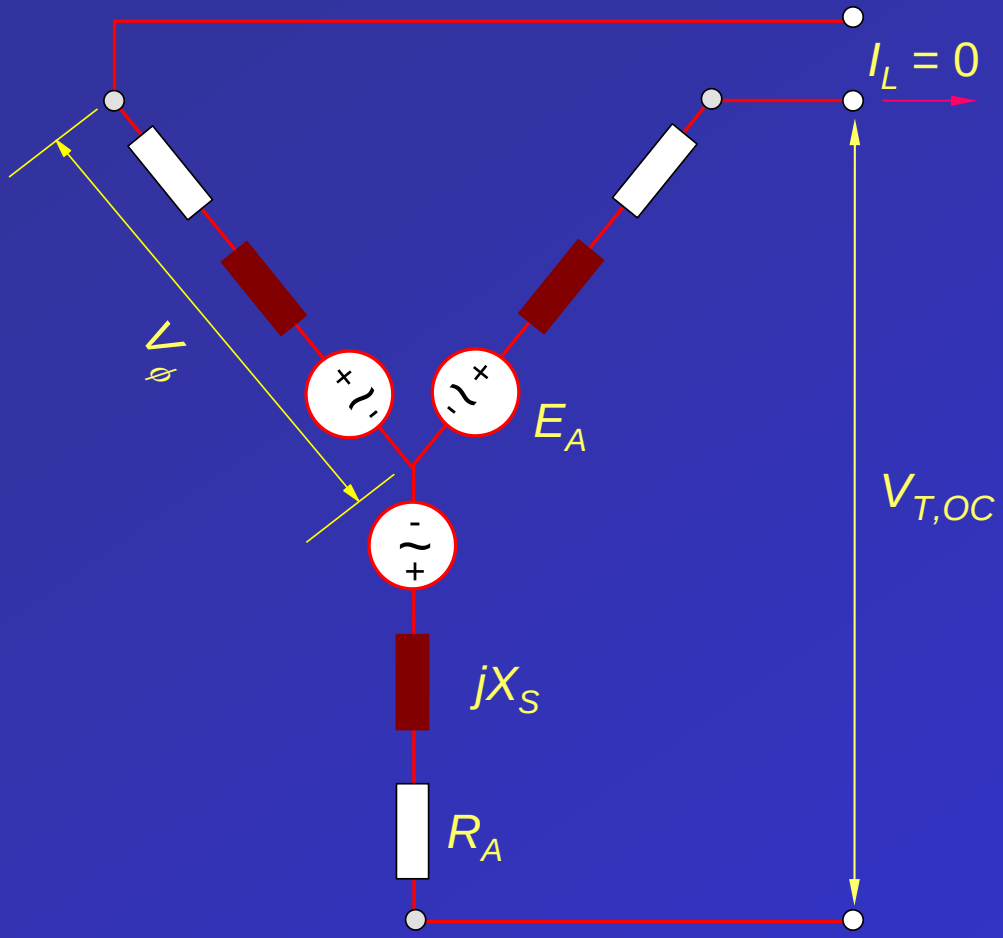
การทดสอบ 11/18



$$2R_A = \frac{V_{DC}}{I_{DC}}$$

$$R_A = \frac{V_{DC}}{2I_{DC}} = \frac{10}{2 \cdot 25} = 0.2 \ \Omega$$

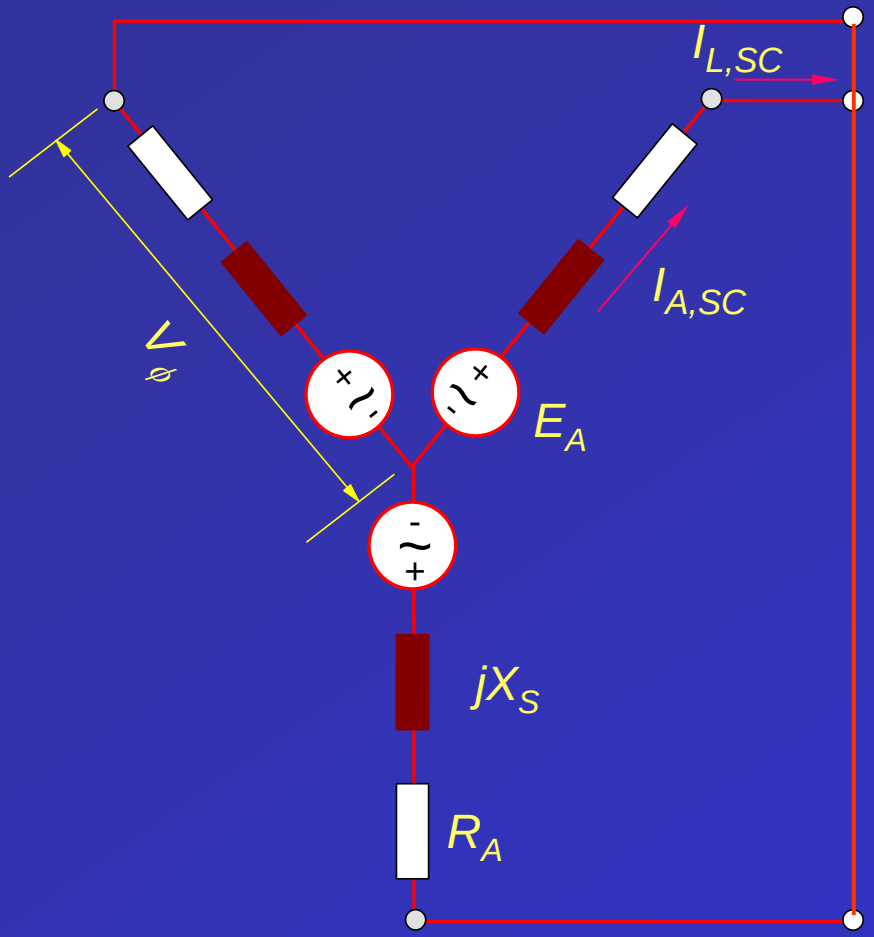
การทดสอบ 12/18



$$E_A = V_{\phi,OC} = \frac{V_{T,OC}}{\sqrt{3}}$$

$$= \frac{540}{\sqrt{3}} = 311.8 \text{ V}$$

การทดสอบ 13/18



$$I_{A,SC} = I_{L,SC} = 300 \text{ A}$$

การทดสอบ 14/18

$$\sqrt{R_A^2 + X_S^2} = \frac{E_{A,OC}}{I_{A,SC}}$$

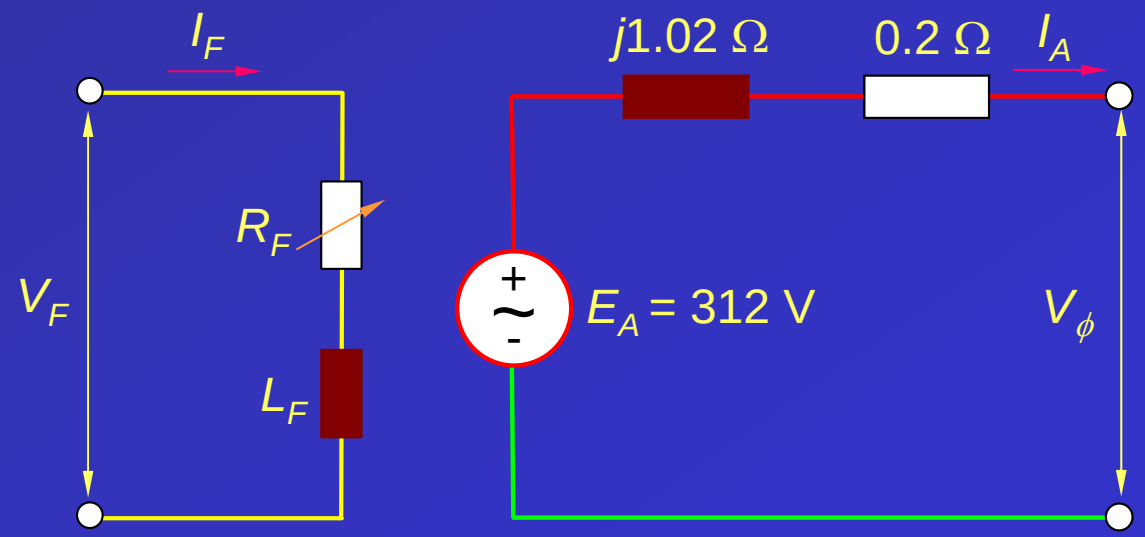
$$\sqrt{0.2^2 + X_S^2} = \frac{311.8}{300} = 1.039$$

$$X_S = 1.02 \quad \Omega$$

ถ้าละเลยผลของ R_A

$$X_S = \frac{E_{A,OC}}{I_{A,SC}} = \frac{311.8}{300}$$

$$= 1.04 \quad \Omega$$



การทดสอบ 15/18

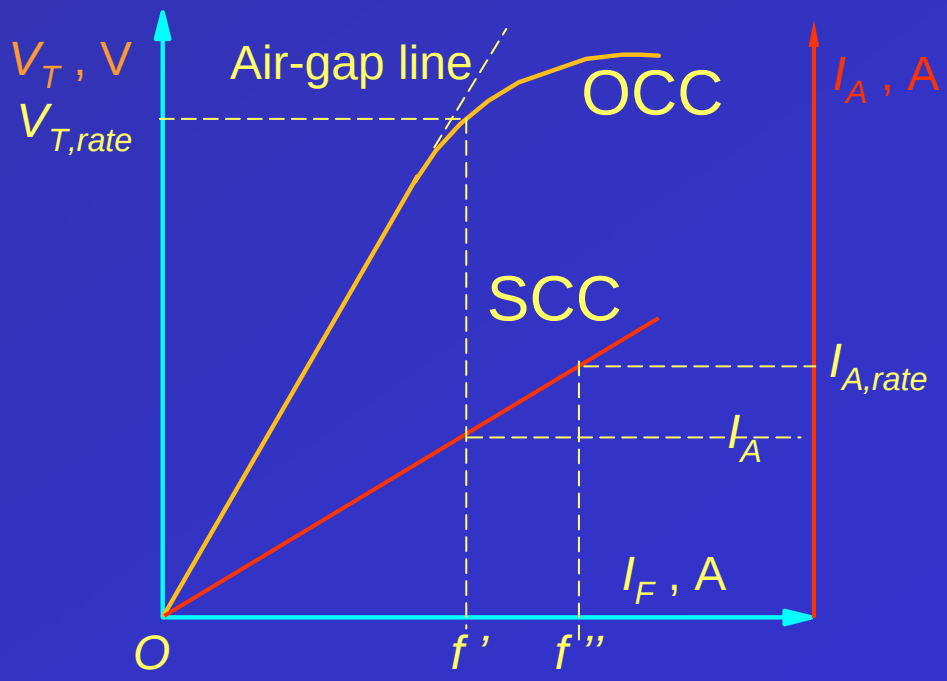
อัตราส่วนลัดวงจร (S/C ratio, SCR)

$$\text{SCR} = \frac{I_f \text{ ที่ต้องการเพื่อสร้างแรงดันพิกัดขณะเปิดวงจร}}{I_f \text{ ที่ต้องการเพื่อสร้างกระแสพิกัดขณะลัดวงจร}}$$

$$= \frac{Of'}{Of''}$$

$$\text{SCR} = \frac{I_A}{I_{A,rate}} \frac{V_{\phi,rate}}{V_{\phi,rate}} = \frac{X_{S,rate}}{X_S}$$

$$= \frac{1}{\text{p.u. } X_S}$$



การทดสอบ 16/18

Ex.4 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด 45 kVA 220 V 6 ขั้ว 50 Hz ต่อแบบ Y มีผลการทดสอบดังนี้

- แรงดันเปิดวงจร $V_{T,OC}$ = 220 V เมื่อป้อน I_F = 2.84 A
- กระแสลัดวงจร $I_{L,SC}$ = 118 A เมื่อป้อน I_F = 2.20 A
- กระแสลัดวงจร $I_{L,SC}$ = 152 A เมื่อป้อน I_F = 2.84 A
- จาก air-gap line แรงดันเปิดวงจร $V_{T,ag}$ = 202 V เมื่อป้อน I_F = 2.20 A

จงหาค่า SCR, $X_{S,unsat}$ และ $X_{S,sat}$

การทดสอบ 17/18

$$I_{A,rate} = \frac{VA_{rate}}{\sqrt{3}V_{T,rate}} = \frac{45000}{\sqrt{3}\cdot 220} = 118 \text{ A}$$

$$\text{SCR} = \frac{I_f \text{ ที่ต้องการเพื่อสร้างแรงดันพิกัดขณะเปิดวงจร}}{I_f \text{ ที่ต้องการเพื่อสร้างกระแสพิกัดขณะลัดวงจร}}$$

$$= \frac{2.84}{2.20} = 1.29 \text{ A}$$

การทดสอบ 18/18

ที่ $I_F = 2.20$ A

$$E_{A,ag} = \frac{V_{T,ag}}{\sqrt{3}} = \frac{202}{\sqrt{3}} = 116.7 \text{ V}$$

$$= \frac{V_{T,ag}}{V_{rate}} = \frac{202}{220} = 0.92 \text{ p.u.}$$

$$I_{L,SC} = 118 \text{ A} = 1 \text{ p.u.}$$

$$X_{S,unsat} = \frac{116.7}{118} = 0.987 \ \Omega$$

$$= \frac{0.92}{1} = 0.92 \text{ p.u.}$$

ที่ $I_F = 2.84$ A

$$E_{A,OC} = \frac{V_{T,OC}}{\sqrt{3}} = \frac{220}{\sqrt{3}} = 127 \text{ V}$$

$$= \frac{V_{T,OC}}{V_{rate}} = \frac{220}{220} = 1 \text{ p.u.}$$

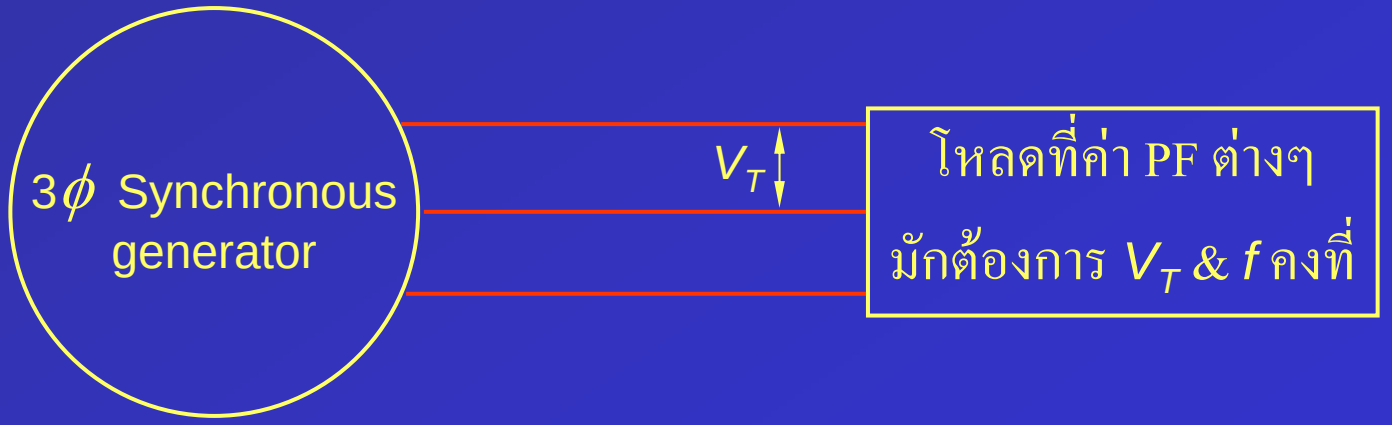
$$I_{L,SC} = 152 \text{ A} = \frac{152}{118} = 1.29 \text{ p.u.}$$

$$X_{S,sat} = \frac{127}{152} = 0.836 \ \Omega$$

$$= \frac{1}{1.29} = 0.775 \text{ p.u.}$$

ลักษณะเฉพาะเมื่อจ่ายโหลด 1/24

- ในบทนี้เราจะศึกษากรณีที่มี เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพียงตัวเดียวจ่ายโหลด
- การทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับประเภทโหลดที่ต่ออยู่กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



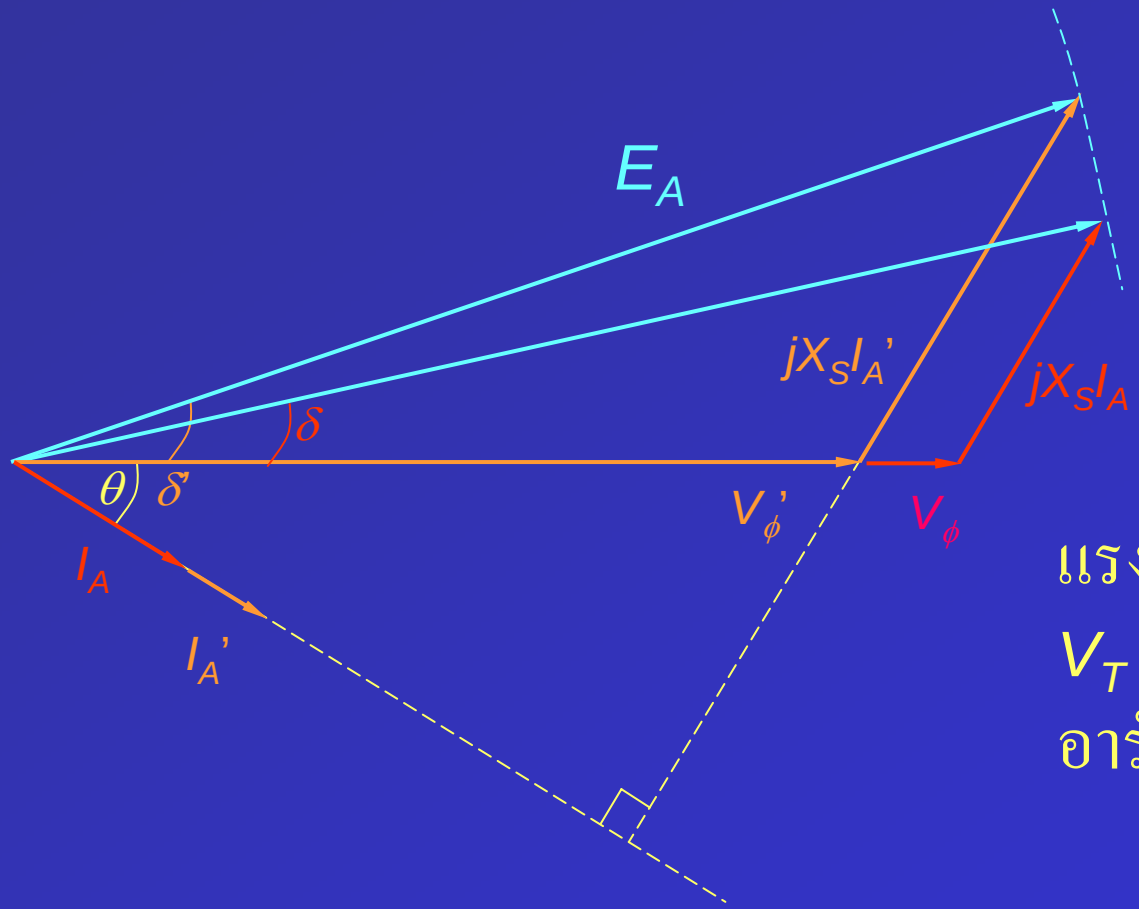
ลักษณะเฉพาะเมื่อจ่ายโหลด 2/24

สมมุติฐานที่ใช้

1. โรเตอร์หมุนด้วยความเร็วคงที่เสมอเพราะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้องจ่ายความถี่ 50 Hz ให้โหลด
2. แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ E_A มีค่าคงที่เสมอ ยกเว้นจะมีการปรับกระแสสนาม I_F
3. โดยทั่วไปจะไม่คำนึงถึงความต้านทานของขดลวดอาร์เมเจอร์ R_A

ลักษณะเฉพาะเมื่อจ่ายโหลด 3/24

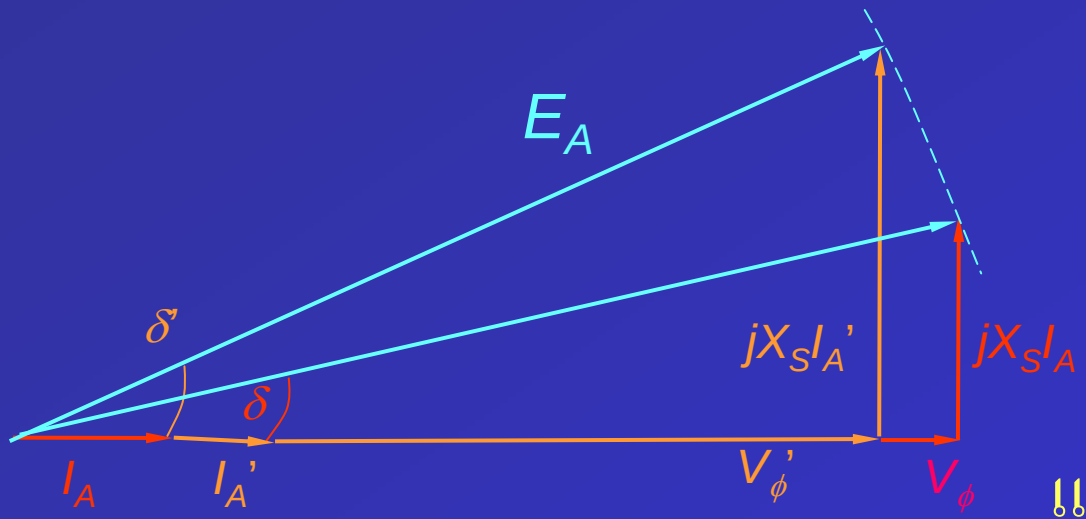
โหลดแบบ PF ล้าหลัง - กระแสเพิ่มในขณะที่ PF คงที่



แรงดัน V_ϕ และแรงดันที่ขั้ว V_T มีขนาดลดลงเมื่อกระแสอาร์เมเจอร์ I_A เพิ่มขึ้น

ลักษณะเฉพาะเมื่อจ่ายโหลด 4/24

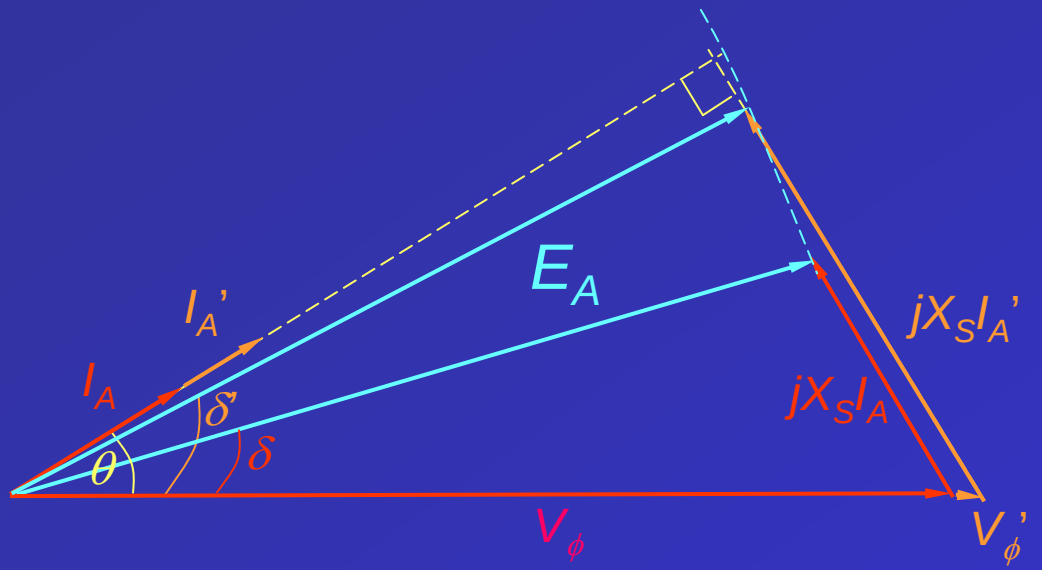
โหลดแบบความต้านทาน (PF=1)



แรงดัน V_ϕ และแรงดันที่ขั้ว V_T มีขนาดลดลงเมื่อกระแสอาร์เมเจอร์ I_A เพิ่มขึ้น

ลักษณะเฉพาะเมื่อจ่ายโหลด 5/24

โหลดแบบ PF นำหน้า - กระแสเพิ่มในขณะที่ PF คงที่



แรงดัน V_ϕ และแรงดันที่ขั้ว V_T มีขนาดเพิ่มขึ้นเมื่อกระแสอาร์เมเจอร์ I_A เพิ่มขึ้น

ลักษณะเฉพาะเมื่อจ่ายโหลด 6/24

โวลเตจเรกกูเลชัน (Voltage regulation, VR)

$$\text{VR} = \frac{V_{nl} - V_{fl}}{V_{fl}} \cdot 100 \ \%$$

เมื่อ

V_{nl} = แรงดันที่ขั้วเมื่อไร้โหลด, V

V_{fl} = แรงดันที่ขั้วเมื่อจ่ายโหลดเต็มพิกัด, V

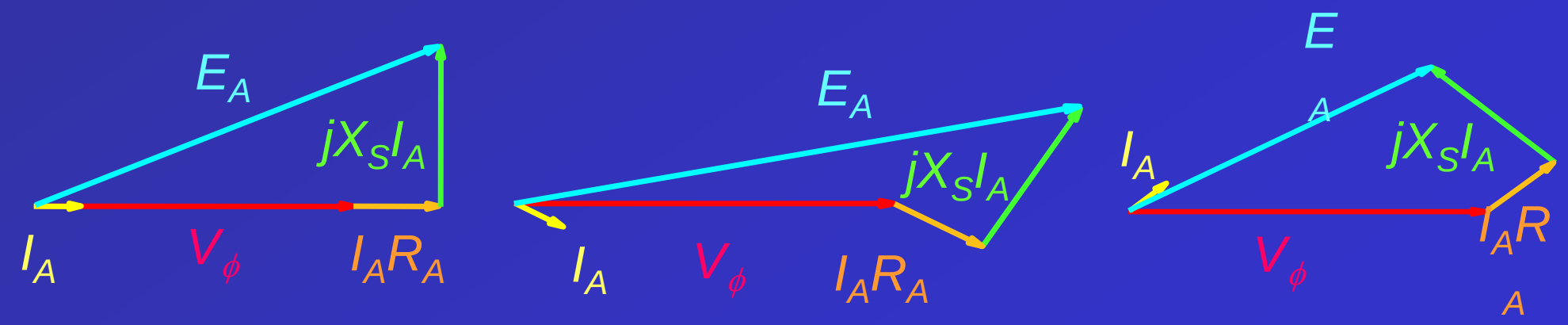
ดังนั้น VR มีค่าเป็นบวก เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายโหลดแบบ PF ล้าหลัง

VR มีค่าเป็นลบ เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายโหลดแบบ PF นำหน้า

ลักษณะเฉพาะเมื่อจ่ายโหลด 7/24

การปรับแรงดัน V_ϕ และแรงดันที่ขั้ว V_T ให้คงที่

- ปรับกระแสสนาม I_F เพื่อให้แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ E_A มีค่าลดลงหรือเพิ่มขึ้นตามประเภทของโหลดที่ต่ออยู่กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

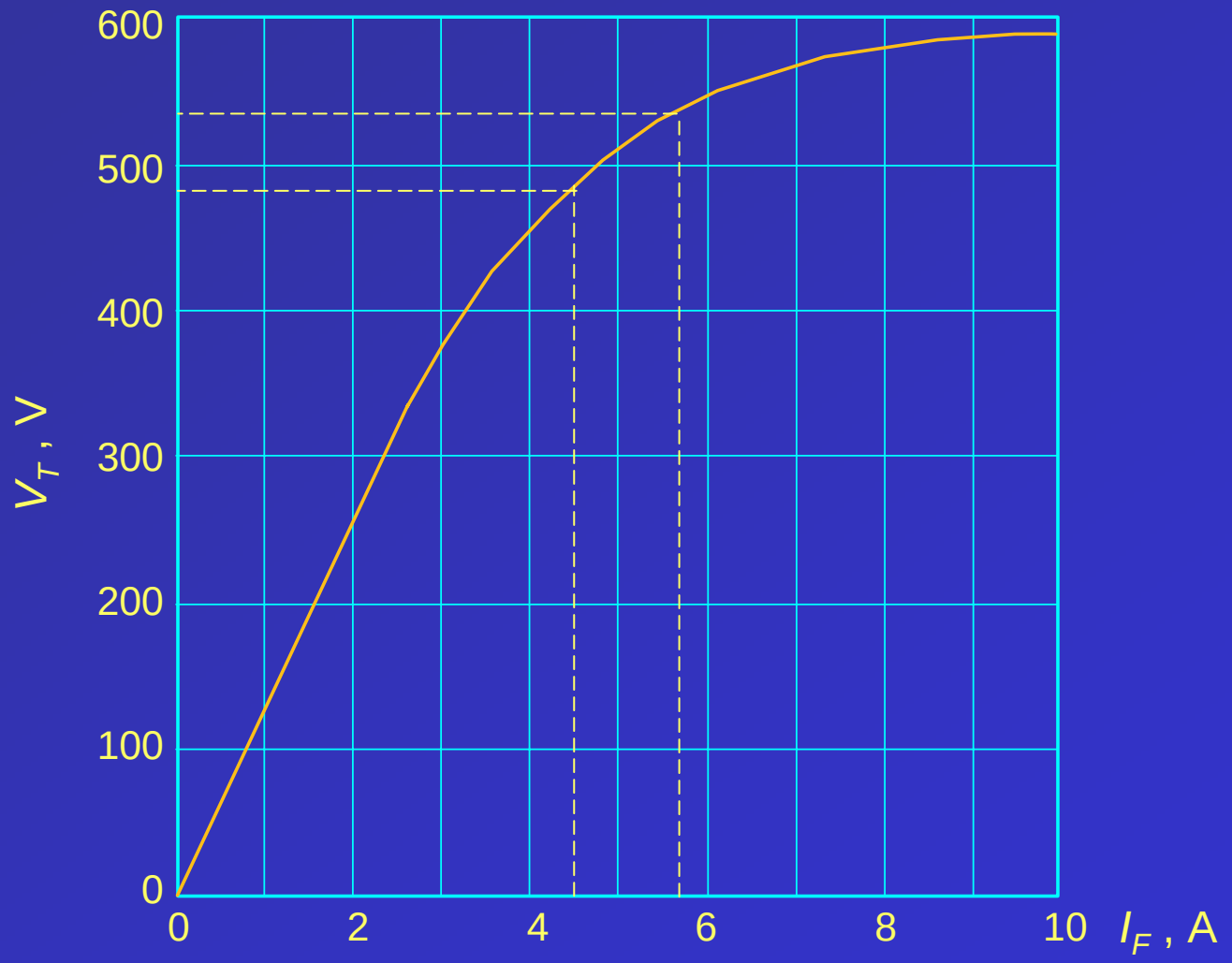


ลักษณะเฉพาะเมื่อจ่ายโหลด 8/24

Ex.5 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด 480 V 4 ขั้ว 60 Hz ต่อแบบ Δ มี OCC ดังรูป และมี $X_S = 0.1\ \Omega$ $R_A = 0.015\ \Omega$ เมื่อทำงานเต็มพิกัด เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายกระแส 1200 A ที่ 0.8 lagging PF ที่ภาวะนี้ $P_{f\&w} = 40$ kW, $P_{core} = 30$ kW และไม่คำนึงกำลังสูญเสียในวงจรสนาม

จงตอบคำถามต่อไปนี้

ลักษณะเฉพาะเมื่อจ่ายโหลด 9/24



ลักษณะเฉพาะเมื่อจ่ายโหลด 10/24

ก) จงหาความเร็วของโรเตอร์

$$n_m = \frac{120 f_e}{P} = \frac{120 \cdot 60}{4} = 1800 \text{ RPM}$$

ข) จงหากระแส I_F ที่ต้องใช้เพื่อทำให้แรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่า 480 V ที่ภาวะไร้โหลด

เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อแบบ Δ ค่า $V\phi = V_T$ และที่ภาวะไร้โหลด $V_T = V\phi = E_A$ จาก OCC จะพบว่าต้องใช้ $I_F = 4.5$ A

ลักษณะเฉพาะเมื่อจ่ายโหลด 11/24

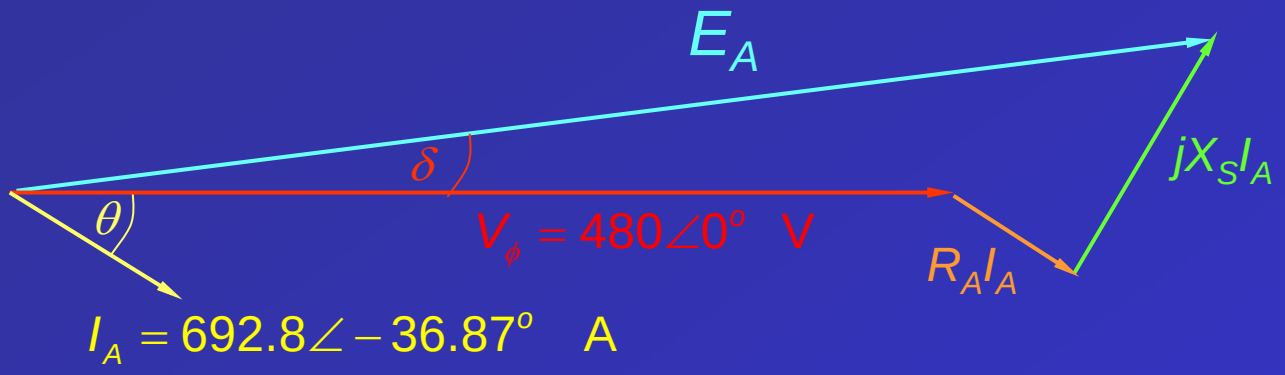
ค) เมื่อต่อกับโหลดที่กินกระแส 1200 A ที่ 0.8 lagging PF เราต้องปรับ I_F ให้มีค่าเท่าใดเพื่อทำให้ $V_T = 480$ V

เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อแบบ Δ ค่า $I_L = \sqrt{3}\, I_A$

$$I_A = \frac{I_L}{\sqrt{3}} = \frac{1200}{\sqrt{3}} = 692.8$$

$$= 692.8 \angle -36.78 \quad \text{A}$$

ลักษณะเฉพาะเมื่อจ่ายโหลด 12/24



$$E_A = V_\phi + R_A I_A + jX_S I_A$$

$$= 480\angle 0^o + 0.015 \cdot 692.8\angle -36.87^o + 0.1\angle 90^o \cdot 692.8\angle -36.87^o$$

$$= 480\angle 0^o + 10.39\angle -36.87^o + 69.28\angle 53.13^o$$

$$= 529.9 + j49.2 = 532\angle 5.3^o \text{ V}$$

ดังนั้นเพื่อให้ $V_T = 480$ V E_A ต้องเท่ากับ 532 V ซึ่งจาก OCC พบว่าต้องใช้ $I_F = 5.7$ A

ลักษณะเฉพาะเมื่อจ่ายโหลด 13/24

ง) จงหา P_{out}, P_{in} และประสิทธิภาพ η

$$P_{out} = \sqrt{3} V_T I_L \cos\theta = \sqrt{3} \cdot 480 \cdot 1200 \cdot 0.8 = 798 \text{ kW}$$

$$P_{in} = P_{out} + P_{losses}$$

$$= P_{out} + \left(P_{I2R} + P_{core} + P_{f\&w} + P_{stray} + P_{field} \right)$$

$$= 798 + \left(3 \cdot 692.8^2 \cdot 0.015 \cdot 10^{-3} + 30 + 40 + 0 + 0 \right)$$

$$= 889.6 \text{ kW}$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \cdot 100 = 89.8 \text{ \%}$$

ลักษณะเฉพาะเมื่อจ่ายโหลด 14/24

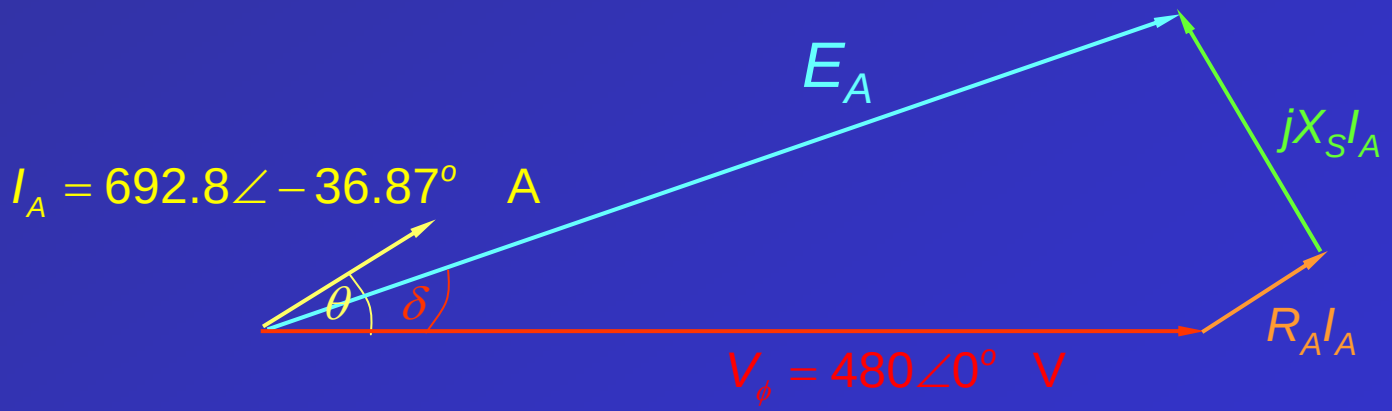
จ) เมื่อปลดโหลดออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ทันทีทันใดจะเกิดอะไรขึ้นกับแรงดันขั้ว V_T

การปลดโหลดออกทำให้ $I_A = 0$ ดังนั้น $V_T = E_A$ เพราะเราไม่ได้ปรับกระแสสนาม I_F ดังนั้นแรงดันขั้วจะเพิ่มจาก 480 V ไปเป็น 532 V

ลักษณะเฉพาะเมื่อจ่ายโหลด 15/24

ฉ) เมื่อต่อกับโหลดที่กินกระแส 1200 A ที่ 0.8 leading PF เราต้องปรับ I_F ให้มีค่าเท่าใดเพื่อทำให้ $V_T = 480$ V

$$I_A = 692.8\angle 36.78^o \quad \text{A}$$



ลักษณะเฉพาะเมื่อจ่ายโหลด 16/24

$$E_A = V_\phi + R_A I_A + jX_S I_A$$
$$= 480\angle 0^o + 0.015 \cdot 692.8\angle 36.87^o + 0.1\angle 90^o \cdot 692.8\angle 36.87^o$$
$$= 480\angle 0^o + 10.39\angle 36.87^o + 69.28\angle 126.87^o$$
$$= 446.7 + j61.7 = 451\angle 7.1^o \ \text{V}$$

ดังนั้นเพื่อให้ $V_T = 480$ V E_A ต้องเท่ากับ 451 V ซึ่งจาก OCC พบว่าต้องใช้ $I_F = 4.1$ A

ลักษณะเฉพาะเมื่อจ่ายโหลด 17/24

Ex.6 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด 480 V 6 ขั้ว 50 Hz ต่อแบบ Y มี $X_S = 1.0\,\Omega$ เมื่อทำงานเต็มพิกัด เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายกระแส 60 A ที่ 0.8 lagging PF ที่ภาวะนี้ $P_{f\&w} = 1.5$ kW, $P_{core} = 1$ kW และไม่คำนึงกำลังสูญเสียในวงจรสนาม ขณะนี้ได้ปรับกระแสสนามเพื่อให้แรงดันขั้วในภาวะไร้โหลดมีค่าเท่ากับ 480 V

จงตอบคำถามต่อไปนี้

ลักษณะเฉพาะเมื่อจ่ายโหลด 18/24

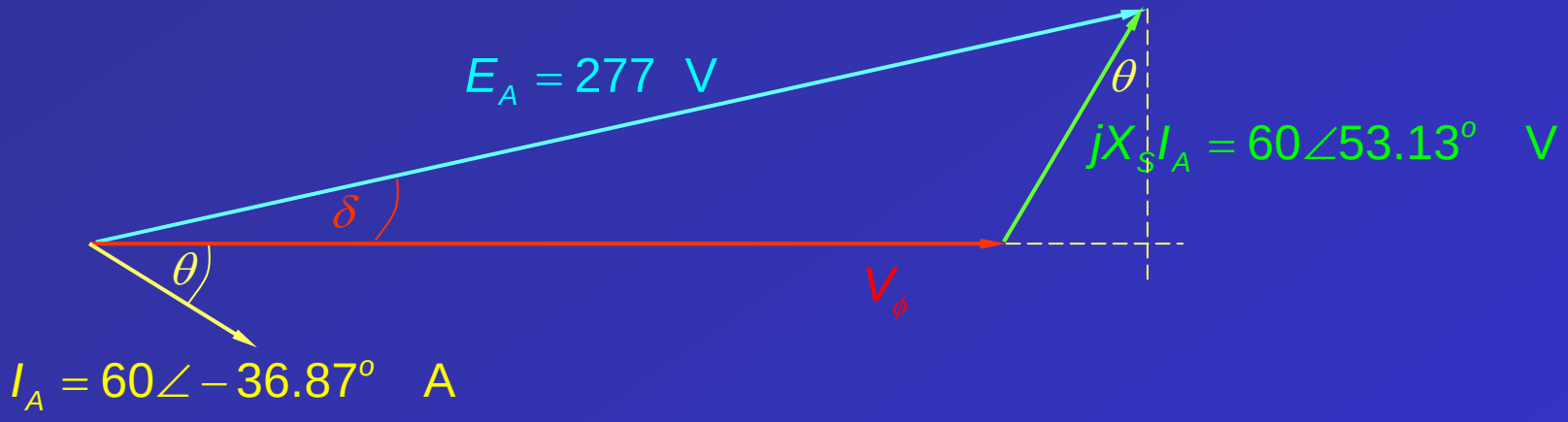
ก) จงหา V_T เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายกระแสพิกัดที่ 0.8 lagging PF, 1.0 PF และ 0.8 leading PF

เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อแบบ Y ค่า $V_T = \sqrt{3} V\phi$ ที่ภาวะไร้โหลด $E_A = V\phi = V_T / 1.732 = 277$ V และจะมีค่านี้ตลอดไปหากไม่มีการปรับกระแส I_F

$$I_A = I_L = 60\angle -36.78^o \quad \text{A}$$

$$jX_S I_A = 1\angle 90^o \cdot 60\angle -36.78^o = 60\angle 53.13^o \quad \text{V}$$

ลักษณะเฉพาะเมื่อจ่ายโหลด 19/24



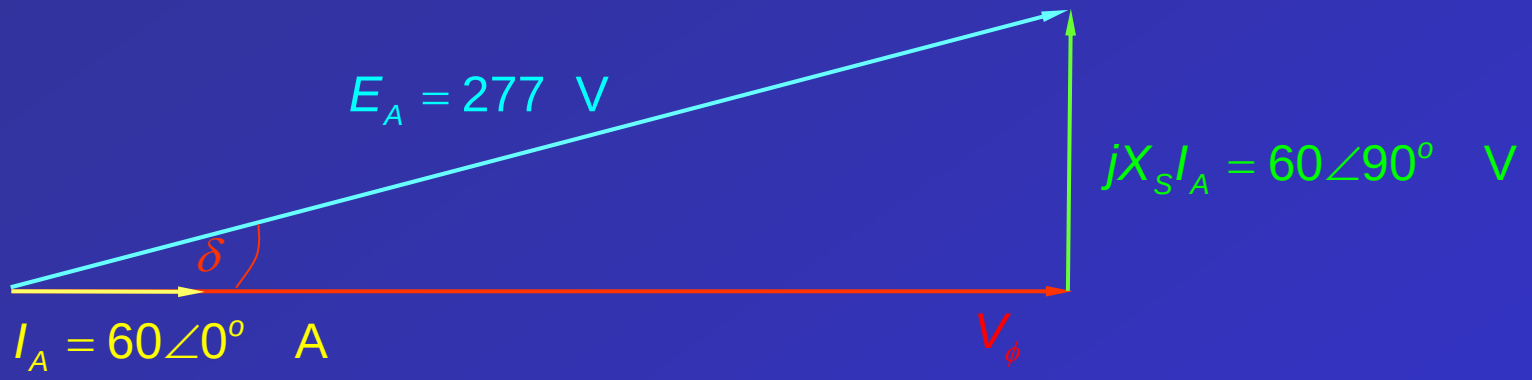
$$E_A^2 = \left(V_\phi + X_S I_A \sin\theta\right)^2 + \left(X_S I_A \cos\theta\right)^2$$

$$277^2 = \left(V_\phi + 1\cdot 60\cdot 0.6\right)^2 + \left(1\cdot 60\cdot 0.8\right)^2$$

$$76729 = \left(V_\phi + 36\right)^2 + 2304$$

$$V_\phi = 263.8 \text{ V} \Rightarrow V_T = \sqrt{3}V_\phi = 410 \text{ V}$$

ลักษณะเฉพาะเมื่อจ่ายโหลด 20/24

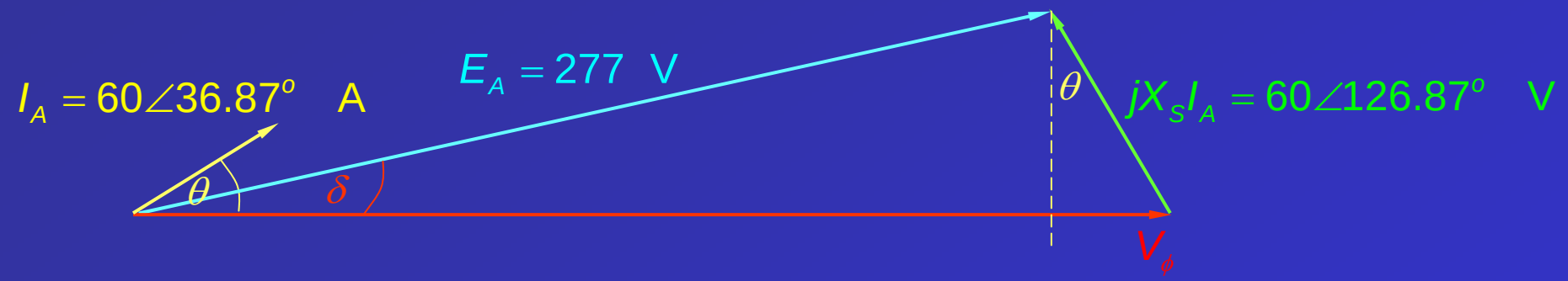


$$E_A^2 = (V_\phi)^2 + (X_S I_A)^2$$

$$76729 = (V_\phi)^2 + 3600$$

$$V_\phi = 270.4 \text{ V} \Rightarrow V_T = \sqrt{3} V_\phi = 468.4 \text{ V}$$

ลักษณะเฉพาะเมื่อจ่ายโหลด 21/24



$$E_A^2 = \left(V_\phi - X_S I_A \sin\theta\right)^2 + \left(X_S I_A \cos\theta\right)^2$$

$$277^2 = \left(V_\phi - 1\cdot 60\cdot 0.6\right)^2 + \left(1\cdot 60\cdot 0.8\right)^2$$

$$76729 = \left(V_\phi - 36\right)^2 + 2304$$

$$V_\phi = 308.8 \text{ V} \Rightarrow V_T = \sqrt{3}V_\phi = 535 \text{ V}$$

ลักษณะเฉพาะเมื่อจ่ายโหลด 22/24

ข) จงหาประสิทธิภาพเมื่อจ่ายกระแสพิกัดที่ 0.8 PF lagging

$$P_{out} = 3V_{\phi}I_A \cos\theta = 3 \cdot 236.8 \cdot 60 \cdot 0.8 = 34.1 \text{ kW}$$

$$P_{in} = P_{out} + \left(P_{I2R} + P_{core} + P_{f\&w} + P_{stray} + P_{field}\right)$$

$$= 34.1 + \left(0 + 1 + 1.5 + 0 + 0\right) = 36.6 \text{ kW}$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \cdot 100 = 93.2 \text{ \%}$$

ลักษณะเฉพาะเมื่อจ่ายโหลด 23/24

ค) จงหา τ_{in} และ τ_{ind} เมื่อจ่ายโหลดพิกัด

$$\tau_{app} = \frac{P_{in}}{\omega_m} = \frac{P_{in}}{2\pi f_m} = \frac{P_{in}}{2\pi f_e \frac{2}{P}} = \frac{36.6 \cdot 10^3}{104.7} = 349.5 \text{ Nm}$$

$$\tau_{ind} = \frac{P_{conv}}{\omega_m} = \frac{P_{out}}{\omega_m} = \frac{34.1 \cdot 10^3}{104.7} = 325.6 \text{ Nm}$$

ลักษณะเฉพาะเมื่อจ่ายโหลด 24/24

ง) จงหา VR เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายกระแสพิกัดที่ 0.8 lagging PF, 1.0 PF และ 0.8 leading PF

$$\text{0.8 PF lagging: } VR = \frac{480 - 410}{410} \cdot 100 = 17.1 \ \%$$

$$\text{1 PF: } VR = \frac{480 - 468}{468} \cdot 100 = 2.6 \ \%$$

$$\text{0.8 PF leading: } VR = \frac{480 - 535}{535} \cdot 100 = -10.3 \ \%$$