

## บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาวิจัยเรื่อง “การวิเคราะห์คุณสมบัติการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ “ ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาเอกสารและงานวิจัย ที่เกี่ยวข้อง จะต้องใช้ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับพื้นฐานการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ในหัวข้อเรื่องที่เกี่ยวข้องกับเงื่อนไขการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และผลที่เกิดขึ้นหลังจากการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 2.1 การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ [1] [4]

ในการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับสองเครื่องเข้าด้วยกัน จะคล้ายกับปัญหาการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงเช่น แรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดทั้งสองเครื่องจะต้องเท่ากัน และจะต้องมีค่าคงเดิมหลังจากทำการขนานกันแล้ว เป็นต้น ในทางปฏิบัตินั้นการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับมีปัญหายุ่งยากกว่ามาก เพราะจะต้องคำนึงถึงลำดับเฟสว่าเป็นแบบตามเข็มนาฬิกา (ลำดับ ACB) หรือทวนเข็มนาฬิกา (ลำดับ ABC) การจัดลำดับเฟสนี้เป็นเรื่องที่สำคัญมากทีเดียวเพราะเกี่ยวข้องกับทิศทางการหมุนของมอเตอร์ด้วย นอกจากแรงดันไฟฟ้าจะต้องเท่ากันทั้งทางขนาดและขั้วจะต้องเหมือนกันแล้ว ความถี่ของทั้งสองเครื่องจะต้องเท่ากันอีกด้วย จึงสามารถขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้

#### 2.1.1 ความจำเป็นที่จะต้องมีการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ในสถานีผลิตกระแสไฟฟ้าจะไม่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่ เพียงตัวเดียว แต่จะใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กหลายตัวมาขนานกัน เพื่อให้ทำงานร่วมกัน โดยมีเหตุผลดังนี้

1. การที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลายๆ เครื่อง จะช่วยแก้ปัญหาในกรณีเครื่องใดเครื่องหนึ่งเกิดการชำรุดเสียหาย ก็สามารถที่จะถอดไปซ่อมแซมและบำรุงรักษาได้ โดยยังให้เครื่องอื่นๆ ผลิตกระแสไฟฟ้าจ่ายโหลดต่อไปได้อย่างต่อเนื่อง
2. เนื่องจากโหลดที่ใช้ประจำวันมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องอยู่ตลอดเวลา ในช่วงเวลาที่โหลดต่างๆ ในระบบสามารถที่จะใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพียงเครื่องเดียวจ่ายโหลดก็ได้ โดยที่เครื่องจะทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ แต่ช่วงเวลาที่มิโหลดเพิ่มขึ้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพียงเครื่องเดียวอาจจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่โหลดได้ไม่เพียงพอ จึงต้องมีการนำเอาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องอื่นๆ มาต่อขนานเข้าไปอีก
3. กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่แต่ละแห่งนั้น จะเพิ่มขึ้นตามความต้องการอยู่เรื่อยๆ ไม่ได้คงที่อยู่ตลอดเวลา ในการที่จะให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องเดิมจ่ายกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามความต้องการใช้กระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นนั้น ย่อมเป็นไปได้เพราะว่าเครื่องจะมีขีดความสามารถในการจ่ายกระแส

ไฟฟ้าได้ที่พิกัดหนึ่งเท่านั้น ดังนั้นจึงต้องมีการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพิ่มขึ้นและต่อขนานเข้ากับเครื่องเดิมที่มีอยู่แล้ว

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในตอนต้นว่า การต่อขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับเข้าด้วยกัน ก็มีหลักการคล้ายๆ กับการต่อขนานกันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง แต่แตกต่างกันตรงที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงไม่มีลำดับเฟสและความถี่มาเกี่ยวข้อง สิ่งที่ต้องคำนึงก็มีเพียงแรงดัน ไฟฟ้าของทั้งสองเครื่องต้องเท่ากัน และกลับขั้วเหมือนกันเท่านั้น (เหมือนกับการต่อเซลล์ไฟฟ้า 2 เซลล์เข้าด้วยกันนั่นเอง) แต่ถ้าเป็นการต่อขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับเข้าด้วยกัน สิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงมีดังนี้

1. แรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสองเครื่องจะต้องเท่ากัน (ความแตกต่างกันของแรงดัน 5% จะทำให้มีทรานเซียนท์เสิร์จ (transient surge) เกิดขึ้นประมาณ 25% ของกระแสเมื่อใช้งานเต็มที่ และจะไหลวนเวียนอยู่ระหว่างเครื่องได้)
2. ความถี่จะต้องเท่ากันแบบไอดีนติคอลล (Identical) ส่วนความเร็วของตัวเครื่องต้นกำลังไม่จำเป็นจะต้องเท่ากันก็ได้
3. แรงดันไฟฟ้าจะต้องมีลำดับเฟสเหมือนกัน และเกิดขึ้นพร้อมกันทั้งสองเครื่อง

เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสองเครื่องที่จะนำมาขนานกัน มีคุณสมบัติครบตามหลักการทั้ง 3 ข้อข้างบนแล้ว ก็จะสามารถนำมาขนานกันได้ทันที แต่ปัญหาที่อยู่ที่ว่ามีการทำอย่างไร จึงจะสามารถนำมาขนานกันได้ทันที แต่ปัญหาก็อยู่ที่จะมีวิธีการทำอย่างไร จึงจะทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสองเครื่องอยู่ในสภาวะที่กำหนดไว้ทั้ง 3 ข้อ สำหรับข้อ 1 นั้นเราสามารถทำได้โดยการใช้โวลต์มิเตอร์ทำการวัดแต่ข้อที่ 2 และ 3 นั้นทำได้โดยการใช้เครื่องวัดความพร้อม (synchroscope)

นอกจากจะใช้ซิงโครสโคป เป็นเครื่องมือช่วยในการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้าด้วยกันแล้ว ยังมีวิธีง่ายๆ ด้วยการใช้หลอดไฟฟ้าเพียง 3 หลอดมาต่อเข้าด้วยกัน เพื่อที่จะช่วยให้ทราบว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสองเครื่องเข้าเฟสกันและกันหรือยัง เราจะเรียกหลอดไฟในการนี้ว่า หลอดเฟส (phasing lamp) แสดงให้เห็นได้โดยการสังเกตอัตราการกระพริบของหลอดไฟ ซึ่งเป็นผลต่างของแรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากผลต่างความถี่ของเครื่องกำเนิดทั้งสอง

สิ่งที่จำเป็นก่อนการขนานเครื่องกำเนิดตัวใหม่เข้ากับบัสบาร์ (bus bars) คือ

- ก) ตรวจสอบลำดับเฟสของเครื่องกำเนิดเครื่องใหม่ให้ตรงกันกับเครื่องเก่า เฟสต่อเฟส
- ข) ปรับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดเครื่องใหม่ ให้เท่ากับแรงดัน ไฟฟ้าที่บัสบาร์
- ค) ปรับความเร็วรอบ เพื่อให้เท่ากับความเร็วที่บัสบาร์ หรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องเก่า

จากสิ่งที่กล่าวมาทั้งหมดนี้ เรื่องของลำดับเฟสเป็นสิ่งสำคัญที่สุด ดังนั้นก่อนการขนานจึงจำเป็นต้องมีการตรวจสอบให้เป็นที่น่าพอใจเสียก่อน

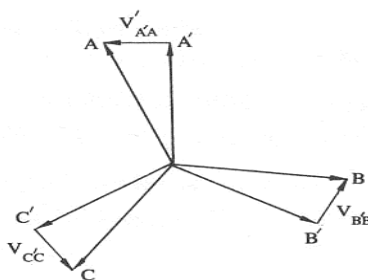
## 2.2 วิธีการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้า [3] [6]

### 2.2.1 วิธีการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยใช้หลอดไฟ

หลักการที่ใช้ในการต่อหลอดไฟ เพื่อใช้ในการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำหรับระบบไฟฟ้าแบบ 3 เฟส นั้น ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีอยู่ 3 วิธีคือ

#### 2.2.1.1 แบบหลอดไฟดับทั้งสามหลอด (dark out)

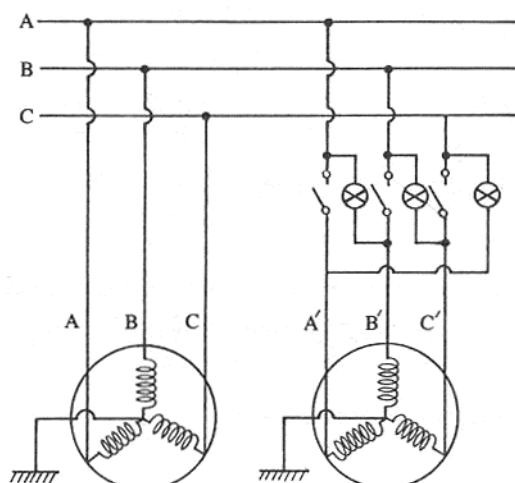
วิธีนี้หลอดทั้งสามจะดับหมดเมื่อแรงเคลื่อนไฟฟ้าทั้งสองอินเฟสกัน เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสองมีการลำดับเฟสเหมือนกัน แต่ความเร็วเชิงมุม ( $\omega$ ) ต่างกันเล็กน้อย เป็นเหตุให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าแต่ละเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสองจะอินเฟสกันทุกๆ ช่วงเวลาหนึ่ง ในตอนที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าของแต่ละเฟสอินเฟสกันนี้ แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ตกคร่อมหลอดไฟ  $V_{AA'}$ ,  $V_{BB'}$  และ  $V_{CC'}$  จะเป็นศูนย์ หลอดจะดับหมดทุกหลอด ต้องสับสวิทช์ทำการซิงโครไนซ์ขณะที่หลอดทั้งสามดับสนิท ถ้าหากว่าทั้งสามหลอดไม่ติดและดับพร้อมกัน แต่ติดดับเรียงลำดับกัน แสดงว่าการลำดับเฟสไม่เหมือนกัน ต้องสับสายคู่ใดคู่หนึ่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวใดก็ได้ในสองตัว แต่ในทางปฏิบัติจะสับสายเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวที่กำลังจะสับสวิทช์ขนานเข้ากับบัสบาร์ เพื่อให้การลำดับเฟสเหมือนกันก่อนทำการซิงโครไนซ์ หลังจากการทำซิงโครไนซ์แล้วหลอดทั้งสามจะดับหมด



(ก) เฟสเซอร์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสองก่อนการซิงโครไนซ์

รูปที่ 2.1 การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบหลอดไฟดับหมด



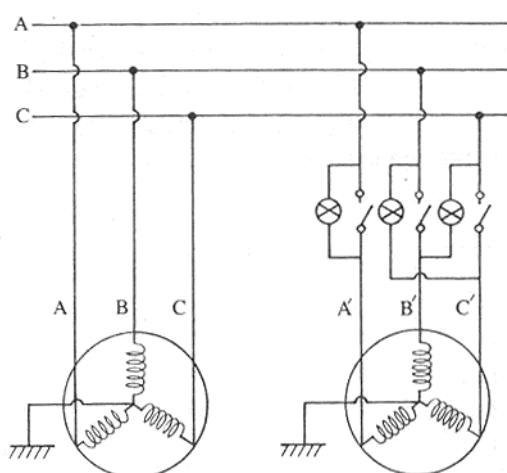


(ข) วงจรการต่อขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสองตัวเข้าด้วยกันโดยต่อหลอดแบบติดหมด

**รูปที่ 2.2** การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบหลอดไฟติดหมด (ต่อ)

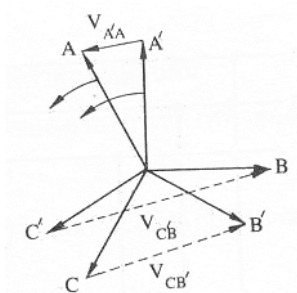
### 2.2.1.3 แบบสว่างสองหลอดและดับหนึ่งหลอด (two bright and one dark)

วิธีนี้หลอดจะติดดับสลับกันเมื่อเรียงลำดับเฟสถูกต้อง ถ้าเรียงลำดับเฟสผิดให้แก้ไขเหมือนสองวิธีแรก การสับสวิทช์ซึ่งโครโนซ์จะสับได้เมื่อแรงเคลื่อนตกคร่อมหลอดดับเป็นศูนย์ ต้องสังเกตการติดดับของหลอดให้ดี หลอดจะติดดับเรียงลำดับไปเรื่อยๆ เช่น หลอดหนึ่งดับ หลอดสองดับ หลอดสามดับ แล้วกลับไปหลอดหนึ่งดับใหม่ พอหลอดที่ต่อเฟสเดียวกันดับก็สับสวิทช์ได้เลย วิธีนี้กับวิธีแรกจะใช้กันมาก วงจรการต่อดังแสดงในรูปที่ 2.3



(ก) วงจรการต่อขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสองตัวเข้าด้วยกันโดยต่อหลอดแบบติดสองดับหนึ่ง

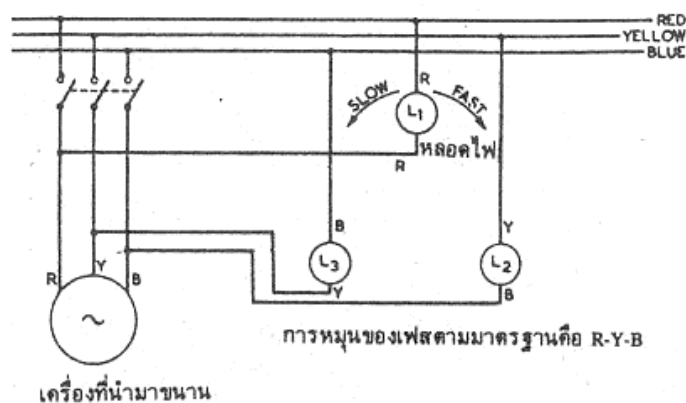
**รูปที่ 2.3** การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบหลอดไฟติดสองดับหนึ่ง



(ข) เฟสเซอร์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสองก่อนการชิงโครไนซ์

รูปที่ 2.3 การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบหลอดไฟติดสองดับหนึ่ง (ต่อ)

สำหรับรูปที่ 2.4 เป็นการจัดเรียงหลอดไฟแบบเรียงลำดับ (sequence) หลอดไฟหลอดหนึ่งจะทำหน้าที่เป็นหลอดหลัก (จากภาพคือหลอด  $L_1$ ) จะต่อเข้ากับเฟสเดียวกัน ส่วนอีกสองหลอดคือ  $L_2$  และ  $L_3$  จะต่อไขว้เฟสกัน ถ้าหากความถี่ของเครื่องกำเนิดแตกต่างกันและถ้าการจัดวางหลอดไฟเป็นรูปสามเหลี่ยมแล้ว หลอดไฟจะติดสว่างหมุนเรียงตามลำดับ โดยทิศทางการหมุนอาจจะหมุนตามเข็มนาฬิกาหรือทวนเข็มนาฬิกา ทั้งนี้ก็เพื่อแสดงว่าเครื่องกำเนิดที่นำมาขนานหมุนเร็วหรือช้า

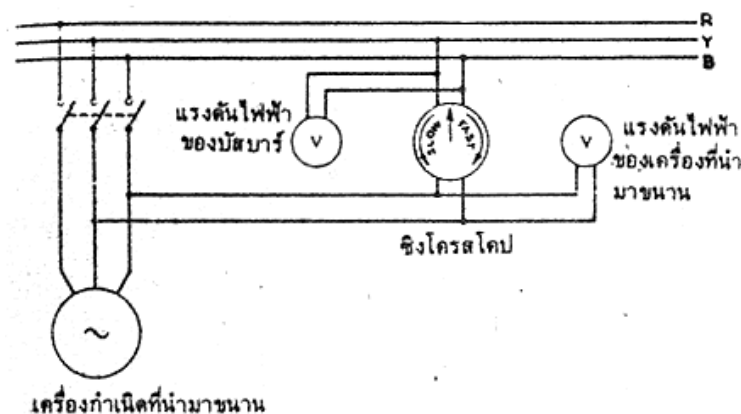


รูปที่ 2.4 การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยใช้หลอดไฟติดสว่างแบบเรียงลำดับ

โอกาสที่จะทำการขนานได้ก็คือ เมื่อหลอดหลัก  $L_1$ ดับ และอีกสองหลอดคือ  $L_2$  และ  $L_3$  ติดสว่างเท่ากัน ถ้าทิศทางการหมุนของเฟสผิด หลอดไฟทั้งสามหลอดจะติดสว่างและดับพร้อมกันๆกัน จะต้องทำการแก้ไขให้ถูกต้องโดยการสับเปลี่ยน ที่คู่เฟสใดคู่เฟสหนึ่งเท่านั้น ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่า หลอดไฟที่ใช้ในการต่อแบบนี้ จะต้องเป็นแบบที่มีพิกัดแรงดันไม่ต่ำกว่า 2 เท่าของแรงดันที่สาย แต่เนื่องจากหลอดไฟที่สามารถทนแรงดันไฟฟ้าได้สูงมากขนาดนี้ ก็หามาใช้ไม่ได้ยาก ดังนั้นอาจจะแก้ปัญหาโดยใช้หลอดไฟมาต่ออนุกรมกันเข้า หรือไม่ก็ใช้หม้อแปลงแรงดันไปเลยก็ได้

### 2.2.2 วิธีการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยซิงโครสโคป

ซิงโครสโคปประกอบด้วยขดลวด 2 ชุด ชุดหนึ่งจะต่อเข้ากับบัสบาร์ และอีกชุดหนึ่งจะต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดที่จะนำมาขนานดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การต่อซิงโครสโคปและโวลต์มิเตอร์

เข็มชี้ของซิงโครสโคปสามารถหมุนได้อย่างอิสระทั้งสองทิศทาง โดยจะชี้ค่าของมุมเฟสระหว่างแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสองแหล่ง เมื่อแรงดันไฟฟ้าของทั้งสองแหล่งเข้าเฟสกัน เข็มชี้ของซิงโครสโคปจะชี้และหยุดนิ่งที่ตำแหน่ง 12 นาฬิกา หน้าปัดของซิงโครสโคปมีการทำเครื่องหมาย FAST และ SLOW เพื่อให้เข็มชี้แสดงว่าเครื่องกำเนิดที่จะนำมาขนานหมุนเร็วหรือช้าเกินไป โปรดจำไว้ว่าไม่ควรต่อซิงโครสโคปไว้ในวงจรนานเกินกว่า 20 นาที เพราะมันจะไม่สามารถใช้งานได้อย่างต่อเนื่องเหมือนเครื่องมือชนิดอื่นๆ

หลังจากที่ทราบลำดับเฟสของแรงดันไฟฟ้า ของเครื่องกำเนิดทั้งสองว่าเหมือนกันแล้ว ให้สังเกตว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งคู่มีความแตกต่างกันหรือไม่ สังเกตได้จากเข็มชี้ที่ติดกับปลายเพลลาของซิงโครสโคป ถ้าเข็มชี้นี้หยุดนิ่งที่เวลา 12 นาฬิกา ก็แสดงว่าความถี่ของเครื่องกำเนิดทั้งสองเครื่องเท่ากันและแรงดันไฟฟ้ามีเฟสเหมือนกัน เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสองเครื่องอยู่ในสถานะที่สามารถขนานกันได้ ก็ทำการสับสวิตช์ของเครื่องให้ปิดได้

ในทางปฏิบัตินั้นเป็นเรื่องที่ยากมาก หรือแทบจะเป็นไปไม่ได้เลยในการที่จะปรับความเร็วของเครื่องจนกระทั่งเข็มชี้ของซิงโครสโคปชี้และหยุดนิ่งที่ตำแหน่ง 12 นาฬิกา ดังนั้นถ้าหากการหมุนของเข็มชี้ใน 1 รอบในทิศทางของ FAST ใช้เวลาน้อยกว่า 5 วินาที อาจจะเริ่มปิดสวิตช์ได้ในทันทีเมื่อเข็มชี้ชี้ที่ตำแหน่งประมาณ 11 นาฬิกา

ขณะที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสองเครื่องทำงานขนานกัน เพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าและพลัง งานให้กับโหลดนั้น พลังงานก็จะถูกแบ่งระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสองเครื่อง โดยจะแบ่งเป็นสัดส่วนกับค่า KVA ของแต่ละเครื่อง

## 2.3 กระแส แรงเคลื่อนไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าจากการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

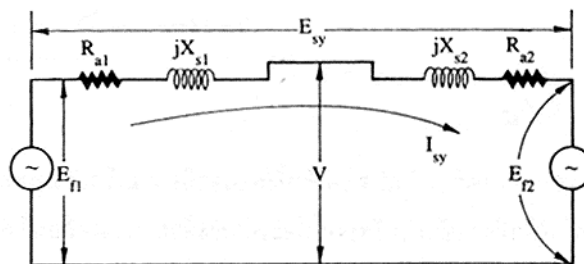
[6][7]

ในการที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสองจะหมุนไปด้วยความเร็วเชิงมุมที่เท่ากันหลังจากสับสวิทช์แล้ว เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสองจะต้องมีการถ่ายเทกำลังงานระหว่างกันคือ เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า และแรงบิดที่ถ่ายเทให้กันและกันเกิดขึ้นอย่างฉับพลันเนื่องจากการสับสวิทช์ ซึ่งโครโนซ์ การถ่ายเทพลังงานลักษณะนี้จะมีผลต่ออุปกรณ์ต่างๆ ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเช่น การจ่ายกระแสไฟฟ้ามีผลทำให้เกิดประกายที่หน้าสัมผัส (contact) ของสวิทช์ซึ่งโครโนซ์ แรงบิดที่เกิดขึ้นอย่างฉับพลันมีผลด้านทางกลต่อตัวต้นกำลังและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังนั้นค่าต่างๆ ที่เกิดขึ้นจากการรักษาสภาพซึ่งโครโนซ์ จะต้องถูกคำนวณหาเพื่อใช้ในการพิจารณาผลอันเกิดจากการสับสวิทช์ ซึ่งโครโนซ์ การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อจ่ายโหลดร่วมกัน พิจารณาในแต่ละกรณีได้ดังนี้

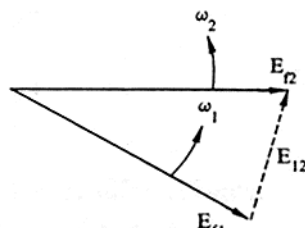
- ก) การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสองตัวเข้าด้วยกันโดยไม่มีโหลดต่ออยู่
- ข) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวหนึ่งจ่ายโหลดอยู่แล้วขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอีกตัวหนึ่งเข้ามาเพื่อจ่ายโหลดร่วมกัน
- ค) การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวใหม่เข้ากับระบบไฟฟ้ากำลัง

### 2.3.1 การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสองตัวเข้าด้วยกันโดยไม่มีโหลดต่ออยู่

ภายหลังจากการสับสวิทช์ซึ่งโครโนซ์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสองเข้าด้วยกัน แรงเคลื่อนไฟฟ้าต่อเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสองจะไม่ทับกัน เนื่องจากความเร็วเชิงมุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสองไม่เท่ากันก่อนที่จะทำการซึ่งโครโนซ์ จากผลอันนี้ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าลัพท์ขึ้น แรงเคลื่อนไฟฟ้าลัพท์นี้เรียกว่า “แรงเคลื่อนไฟฟ้าซึ่งโครโนซ์” ใช้ตัวย่อว่า  $E_{sy}$  มีค่าเท่ากับผลต่างของเคลื่อนไฟฟ้าที่ขั้วระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสอง ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าลัพท์นี้ไม่สามารถวัดได้ในทางปฏิบัติ แต่แสดงให้เห็นได้โดยใช้แผนภาพเฟสเซอร์ประกอบและคำนวณหาได้ ผลของแรงเคลื่อนไฟฟ้าลัพท์จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลวนในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสองโดยมีตัวหนึ่งจ่ายกระแสไฟฟ้า และอีกตัวหนึ่งรับกระแสไฟฟ้ากระแสไฟฟ้านี้เรียกว่า “กระแสซึ่งโครโนซ์” (synchronizing current) ใช้ตัวย่อ  $I_{sy}$



(ก) วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 2 ตัวขนานกัน

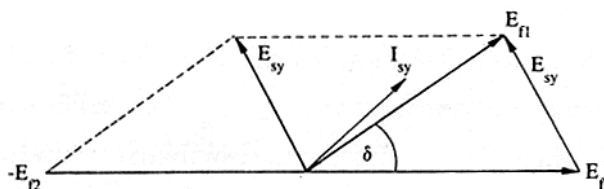


$E_{12}$  แรงเคลื่อนไฟฟ้าคกรวมหลอดเฟสซึ่ง

(ค) แผนภาพเฟสเซอร์ของ  $E_{f1}$  และ  $E_{f2}$  ก่อนสับสวิทช์ซิงโครไนซ์

(ง)

รูปที่ 2.6 แผนภาพเฟสเซอร์ก่อนและหลังสับสวิทช์ซิงโครไนซ์ ในกรณีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสองตัวขนานเข้าด้วยกันโดยไม่มีโหลดต่ออยู่



(ค) แผนภาพเฟสเซอร์ของ  $E_{f1}$  กับ  $E_{f2}$  และ  $E_{sy}$  กับ  $I_{sy}$  หลังสับสวิทช์ซิงโครไนซ์

รูปที่ 2.6 แผนภาพเฟสเซอร์ก่อนและหลังสับสวิทช์ซิงโครไนซ์ ในกรณีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสองตัวขนานเข้าด้วยกันโดยไม่มีโหลดต่ออยู่ (ต่อ)

แรงเคลื่อนไฟฟ้าซิงโครไนซ์ซึ่งจะมีค่ามากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับสาเหตุ 2 ประการ ต่อไปนี้

ก) แรงเคลื่อนไฟฟ้าเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสองไม่เท่ากัน

ข) เกิดจากความเร็วเชิงมุมของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสองไม่เท่ากัน ก่อนทำการซิงโครไนซ์ ตามปกติการที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสองจะขนานกันได้นี้ ความเร็วเชิงมุมของแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสองต้องต่างกันเล็กน้อย เพื่อให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเฟสทั้งสองไล่กันทัน และสับสวิทช์ซิงโครไนซ์ได้ เมื่อ

$$\text{ความเร็วเชิงมุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวที่หนึ่ง} (\omega_1) = 2\pi f_1$$

$$\text{ความเร็วเชิงมุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวที่สอง} (\omega_2) = 2\pi f_2$$

สมมติว่า  $\omega_1$  มีค่ามากกว่า  $\omega_2$  เพราะว่า  $f_1$  มากกว่า  $f_2$  ตามรูปที่ 2.6 เมื่อยังไม่สับสวิตช์ซึ่งโครไนซ์แรงเคลื่อนไฟฟ้า  $E_{f1}$  ต้องตามมาทันและอินเฟสกับ  $E_{f2}$  ทุกช่วงระยะเวลาหนึ่งเช่น ทุกๆ 10 วินาที ถ้า  $f_1 = 50.1$  และ  $f_2 = 50$  และสับสวิตช์ในจังหวะที่  $E_{f1}$  อินเฟสกับ  $E_{f2}$  พอดี เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวที่หนึ่งมีอัตราเร่งหรือความเร็วเชิงมุมสูงกว่า ดังนั้นแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวที่หนึ่งต้องนำหน้าห่างออกไปทำมุมกับ  $E_{f2}$  เรียกว่ามุมกำลัง (power angle) ใช้ตัวย่อว่า  $\delta$  ถ้ามุมยิ่งกว้างแรงเคลื่อนไฟฟ้าลัพท์จะยิ่งมาก รูปที่ 2.6 ประกอบ

ถ้า  $E_{sy}$  กับ  $I_{sy}$  แสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\bar{E}_{sy} = \bar{E}_{f1} - \bar{E}_{f2} \quad (2.1)$$

$$\bar{I}_{sy} = \frac{\bar{E}_{sy}}{Z_{s1} + Z_{s2}} \quad (2.2)$$

ภายหลังจากที่มีกระแส  $I_{sy}$  ไหลในวงจรแล้ว เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสองจะมีความเร็วเชิงมุมเท่ากันคือ  $\omega$  แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต่อเข้ากับบัสบาร์ ก็จะเท่ากันด้วย แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่บัสบาร์แสดงได้ตามสมการที่ 2.3

$$\begin{aligned} \bar{V} &= \bar{E}_{f1} - \bar{I}_{sy}Z_{s1} \\ &= \bar{E}_{f2} - \bar{I}_{sy}Z_{s2} \end{aligned} \quad (2.3)$$

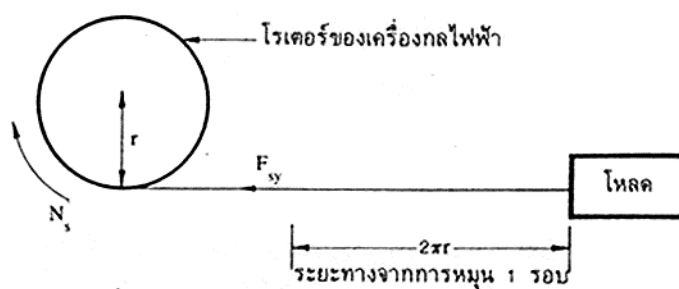
หมายเหตุ ถ้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวที่สองมีความเร็วเชิงมุมเร็วกว่าตัวที่หนึ่ง  $E_{f2}$  จะนำหน้า  $E_{f1}$  ดังภาพเฟสเซอร์และกระแส  $I_{sy}$  ในรูปที่ 2.6 จะมีทิศทางตรงกันข้ามคือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวที่สองเป็นตัวจ่ายกระแสไฟฟ้าให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวที่หนึ่ง สมการที่ 2.1 ถึงสมการที่ 2.3 จะเปลี่ยนเป็นดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \bar{E}_{sy} &= \bar{E}_{f2} - \bar{E}_{f1} \\ \bar{I}_{sy} &= \frac{\bar{E}_{sy}}{Z_{s1} + Z_{s2}} \\ \bar{V} &= \bar{E}_{f1} + \bar{I}_{sy}Z_{s1} \\ \bar{V} &= \bar{E}_{f2} - \bar{I}_{sy}Z_{s2} \end{aligned} \quad (2.4)$$

กำลังไฟฟ้าและแรงบิดที่รักษาสภาพซิงโครไนซ์ (synchronizing power and synchronizing torque) ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสองตัวต่อซิงโครไนซ์กันโดยยังไม่จ่ายโหลดดังรูปที่ 2.6 (ก) กระแสซิงโครไนซ์จะรักษาสภาพซิงโครไนซ์ไว้จึงเรียกว่า “กำลังไฟฟ้าที่รักษาสภาพซิงโครไนซ์” มีค่าเท่ากับผลคูณของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสองคูณด้วยค่า  $\sin$  (มุมต่างเฟสของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสอง) และหารด้วยขนาดของอิมพีแดนซ์รวมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสองซึ่งส่งกำลังไฟฟ้าผ่าน

$$P_{sy} = \frac{E_{f1}E_{f2}}{|Z_{s1} + Z_{s2}|} \sin \delta \quad \text{W/ph} \quad (2.5)$$

กำลังไฟฟ้าที่รักษาสภาพซิงโครไนซ์ จะเป็นตัวปรับสภาพให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสองมีความเร็วเชิงมุมเท่ากัน หลังจากสับสวิตซ์ซิงโครไนซ์กันแล้วคือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวหนึ่งจะเป็นตัวจ่ายพลังงานและอีกตัวหนึ่งเป็นตัวรับพลังงาน



รูปที่ 2.7 การหาค่าแรงบิดที่รักษาสภาพซิงโครไนซ์

จากรูปที่ 2.6 จะเห็นว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวที่จ่ายกระแสไฟฟ้าหรือกำลังไฟฟ้า ทำหน้าที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และผลของกระแสที่ไหลในทิศทางที่จ่ายออกจะสร้างแรงบิดขึ้นต้านกับการหมุนของตัวต้นกำลังที่ขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ทำให้ความเร็วเชิงมุม  $\omega_1$  ลดลงเหลือความเร็วเชิงมุมลัพท์  $\omega$  สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอีกตัวหนึ่งเป็นตัวรับกระแสไฟฟ้าหรือกำลังไฟฟ้า จึงกลายเป็นมอเตอร์ และกระแสไฟฟ้าจำนวนนี้ทำให้เกิดแรงบิดขึ้นมีทิศทางเสริมกับความเร็วเชิงมุมสูงขึ้นจาก  $\omega_2$  เป็น  $\omega$  ดังนั้นความเร็วเชิงมุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสองตัวหลังจากซิงโครไนซ์กันจะเท่ากับ  $\omega$  โดยมีกำลังไฟฟ้าถ่ายเทระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสองเป็นตัวรักษาสภาพไม่ให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสองหลุดออกจากสภาพซิงโครไนซ์ แรงบิดที่ทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสองมีความเร็วเชิงมุมร่วมกันที่  $\omega$  นี้เรียกว่า “แรงบิดที่รักษาสภาพซิงโครไนซ์” (synchronizing torque) ใช้ตัวย่อว่า  $T_{sy}$  ซึ่งหาค่าได้ดังแสดงในรูปที่ 2.7

เมื่อ  $r$  คือ รัศมีของตัวโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$F_{sy}$  คือ แรงที่เกิดจากการจ่ายโหลดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แรงต้านการหมุน  
กระทำในแนวตั้งฉากกับจุดหมุน

$T_{sy}$  คือ แรงบิดต้านการหมุนขั้วของตัวต้นกำลัง

$$T_{sy} = (F_{sy})(r) \quad (2.6)$$

งานทางกลใน 1 วินาที = (แรง)(ระยะทางที่ได้จากการทำงานในเวลา 1 วินาที)

ในเวลา 1 วินาที เครื่องกำเนิดไฟฟ้าหมุน  $N_s/60$  รอบ ได้ระยะ  $2\pi r(N_s/60)$  เมตร / วินาที

$$\begin{aligned} \text{งานทางกลใน 1 วินาที} &= (F_{sy}) 2\pi r \frac{N_s}{60} \quad \text{Nm/s} \\ &= 2\pi T_{sy} \frac{N_s}{60} \quad \text{Nm/s} \end{aligned}$$

เมื่องานทางกลเท่ากับงานทางไฟฟ้า

$$\begin{aligned} 3\phi P_{sy} &= 2\pi T_{sy} \frac{N_s}{60} \\ T_{sy} &= \frac{(60)(3\phi P_{sy})}{2\pi N_s} \quad \text{N} \end{aligned} \quad (2.7)$$

เมื่อ  $N_s = \frac{120f}{p}$

สำหรับในกรณีนี้ แรงบิดตามสมการที่ 2.7 เป็นแรงบิดที่ต้านการขั้วของตัวต้นกำลังที่ขั้วเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวที่หนึ่ง ทำให้ความเร็วเชิงมุมลดลงเป็น  $\omega$  ถ้าไม่เกิดกำลังสูญเสียในสายป้อน บัสบาร์ และความต้านทานของขดอาร์เมเจอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสอง แรงบิดจำนวนเดียวกันนี้จะเท่ากับแรงบิดที่เสริมแรงขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวที่สอง ทำให้ความเร็วเชิงมุมเพิ่มขึ้นจากค่าเดิมมาเป็น  $\omega$

### 2.3.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวหนึ่งจ่ายโหลดอยู่ขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอีกตัวเข้ามาเพื่อช่วยในการจ่ายโหลด

จะได้สมการแรงเคลื่อนไฟฟ้าเชิงครโนซึ่ง ดังสมการที่ 2.8

$$\bar{E}_{sy} = \bar{E}_{f2} - \bar{V} \quad (2.8)$$

เมื่อ  $\omega_2$  มีค่ามากกว่า  $\omega_1$

$V$  เป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวที่หนึ่ง หรือแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่บัสบาร์ที่ถือว่าคงที่ เพราะ  $P_{sy}$  มีค่าน้อยกว่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่โหลดมาก หรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวที่หนึ่งมีวงจรควบคุมค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าปรับแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ขั้วให้คงที่อยู่เสมอ

$E_{f2}$  เป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวที่สองขณะไม่มีโหลด

ถ้าให้  $\omega_1$  มีค่ามากกว่า  $\omega_2$  สมการที่ 2.8 จะต้องเป็นดังนี้

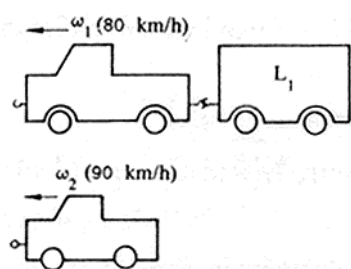
$$E_{sy} = \bar{V} - \bar{E}_{f2}$$

จะได้กระแสเชิงโครโนซึ่ง

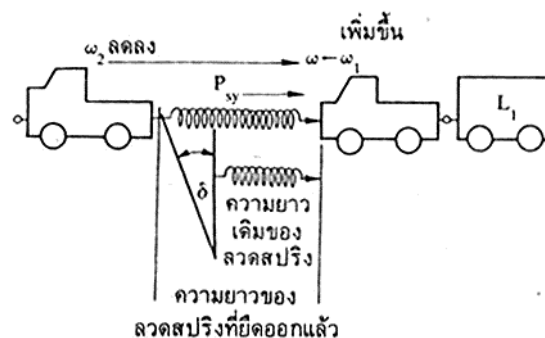
$$I_{sy} = \frac{\bar{E}_{sy}}{Z_{s2}} \quad (2.9)$$

โดยถือว่า  $I_{sy}$  จำนวนนี้เป็นกระแสไฟฟ้า ทำให้เกิดการถ่ายเทกำลังไฟฟ้าระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวที่สองกับบัสบาร์ คือกำลังไฟฟ้าที่รักษาสภาพเชิงโครโนซึ่งดังสมการที่ 2.10

$$P_{sy} = \frac{VE_{f2}}{Z_{s2}} \sin \delta \quad (2.10)$$

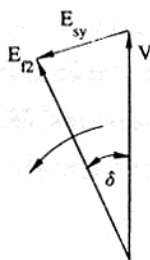


(ก) ก่อนเชิงโครโนซ์เข้าด้วยกัน



(ข) หลังจากเชิงโครโนซ์เข้าด้วยกัน มุม  $\delta$  เป็นมุมที่เกิดขึ้นจากการยืดของสปริงเมื่อมีการส่งกำลัง  $P_{sy}$  ผ่านสปริง  $\omega = 81 \text{ km/h}$

รูปที่ 2.8 ภาพทางกลที่เหมือนกับการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ตัวหนึ่งมีโหลดอยู่



- (ค) แผนภาพเฟสเซอร์ของ  $V$  กับ  $E_{f2}$  หลังสับสวิตช์ซึ่งโครไนซ์  $\delta =$  มุมกำลัง ซึ่งเป็นมุมที่กำหนดค่าการถ่ายเทกำลังไฟฟ้า  $P_{sy}$

**รูปที่ 2.8** ภาพทางกลที่เหมือนกับการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ตัวหนึ่งมีโหลดอยู่ (ต่อ)

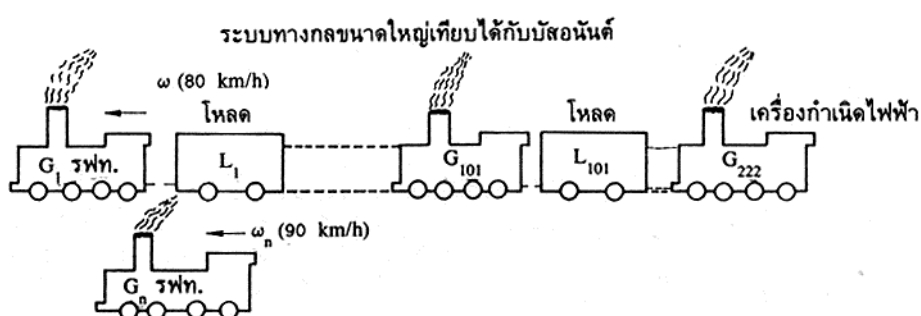
สมการแรงบิดที่รักษาภาพซึ่งโครไนซ์จะเหมือนกันกับสมการที่ (2.7) แรงบิดที่รักษาภาพซึ่งโครไนซ์ ทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีความเร็วเชิงมุมรวมอันเดียวกันคือ  $\omega$  ความเร็วเชิงมุม  $\omega$  จะมีค่าใกล้เคียงกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวที่ใหญ่กว่า ถ้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวที่หนึ่งใหญ่กว่าตัวที่สองมาก จะเปรียบเทียบลักษณะการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสองตัวขนานเข้าด้วยกัน โดยมีตัวหนึ่งจ่ายโหลดอยู่เป็นรูปจำลองในลักษณะทางกล

ตัวอย่างเช่น รถสองคันคือรถบรรทุก  $G_1$  และรถปิคอัพ  $G_2$  วิ่งด้วยความเร็ว  $\omega_1$  ลากโหลด  $L_1$  รถปิคอัพ  $G_2$  ซึ่งวิ่งด้วยความเร็ว  $\omega_2$  จะเข้ามาพ่วงโดยใช้ลวดสปริงต่อเชื่อมกับรถบรรทุก  $G_1$  เพื่อช่วยลากโหลด เมื่อรถปิคอัพวิ่งทันรถบรรทุก รถปิคอัพซึ่งมีความเร็วสูงกว่าได้แซงรถบรรทุกขึ้นไป ซึ่งเปรียบเสมือนหนึ่งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวที่มีความเร็วเชิงมุมสูงกว่า ดีจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีความเร็วเชิงมุมต่ำกว่านั่นเอง การดีจากนี้ทำให้เกิดแรงดึงในลวดสปริง ทำให้การถ่ายเทกำลังงานจากรถปิคอัพผ่านลวดสปริงไปยังรถบรรทุกที่พ่วงกันกับโหลด การถ่ายเทกำลังงาน ( $P_{sy}$ ) จะปรับให้ทั้งสองมีความเร็วร่วมกันเป็น  $\omega$  ซึ่งในที่นี้มีค่าใกล้เคียง  $\omega_1$  มาก เนื่องจากรถบรรทุกใหญ่กว่ามีค่าโมเมนตัมมากกว่า กำลังงานอันนี้เทียบได้กับกำลังไฟฟ้าที่รักษาภาพซึ่งโครไนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า  $P_{sy}$  เป็นตัวทำให้รถปิคอัพมีความเร็วลดลงเป็น  $\omega$  และ  $P_{sy}$  ที่รถบรรทุกได้รับทำให้รถบรรทุกเพิ่มความเร็วเป็น  $\omega$  คือรถทั้งสองพร้อมโหลดจะมีความเร็วรวมที่เท่ากัน ซึ่งกรณีนี้เป็นความเร็วที่ใกล้เคียงกับความเร็วเดิมของรถบรรทุกที่ลากโหลด  $L_1$  เนื่องจากรถปิคอัพเล็กกว่าและมีโมเมนตัมน้อยกว่ารถบรรทุก การยืดของสปริงจากการที่มีการถ่ายเทกำลังจะทำให้เกิดมุมกำลังขึ้นคล้ายกับมุมที่เกิดขึ้น เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสองขนานเข้าด้วยกัน

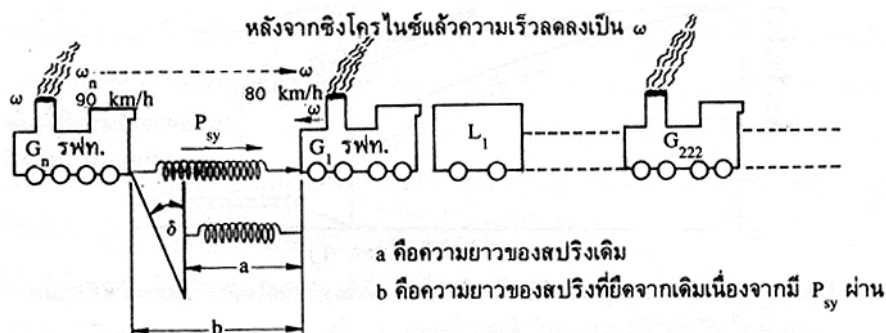
### 2.3.3 การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวหนึ่งเข้ากับระบบไฟฟ้ากำลัง

ระบบไฟฟ้ากำลังแห่งชาติของแต่ละประเทศเป็นระบบไฟฟ้ากำลังที่ใหญ่มาก มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นร้อยๆ ตัวขนานเข้าด้วยกัน จ่ายโหลดที่ต่อมากมาयर่วมกันตลอดทั้งวันทั้งคืน เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละตัวที่อยู่ในระบบอาจหยุดการจ่ายโหลดโดยถูกปลดออกจากระบบหรือขนานกลับเข้าไปใหม่ในระบบได้ความต้องการ เพื่อควบคุมการจ่ายโหลดให้มีประสิทธิภาพหรือตามความจำเป็นที่จะต้องบำรุงรักษาเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ระบบฟ้าขนาดใหญ่ในทางทฤษฎีจะแทนด้วยบัสอนันต์ (infinite bus) ซึ่งถือว่าบัสนี้จะมีค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าและความถี่คงที่ตลอดเวลา ไม่ว่าจะมีการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับบัส หรือดึงกำลังไฟฟ้าออกจากบัสเท่าใดก็ตาม กรณีนี้จะแทนด้วยรูปจำลองทางกลได้ดังรูปที่ 2.9 หัวรถจักรแทนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละตัวในระบบไฟฟ้า ตู้บรรทุกแทนโหลดแต่ละหน่วยทางไฟฟ้า หัวรถจักร  $G_n$  แทนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่จะทำการขนานเข้ากับระบบไฟฟ้า

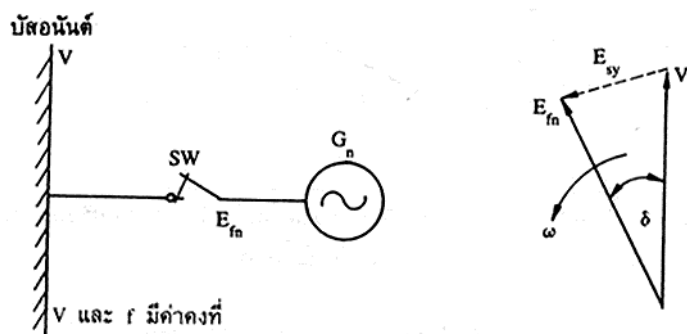


(ก) สภาพก่อนชิงโครไนซ์เข้าด้วยกัน



(ข) สภาพหลังชิงโครไนซ์เข้าด้วยกัน

รูปที่ 2.9 รูปทรงกลแสดงจินตนาภาพแทนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวหนึ่งขนานเข้ากับระบบไฟฟ้า



(ค) การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวหนึ่งเข้ากับระบบไฟฟ้า

**รูปที่ 2.9** รูปทรงกลแสดงจินตภาพแทนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวหนึ่งขนานเข้ากับระบบไฟฟ้า (ต่อ)

รถไฟหลายร้อยหัวพ่วงกับตู้โหลดมากมายเป็นระบบทางกลที่ใหญ่มาก ซึ่งเปรียบเสมือนกับระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่หรือบัสอนันต์ ขนานหวัตรจักร  $G_n$  เข้ากับระบบอันนี้ หลังจากซึ่งโครโนซ์เข้าด้วยกันแล้ว จะเห็นว่าหวัตรจักร  $G_n$  ที่มีความเร็วสูงกว่าจะเป็นตัวจ่ายกำลังไฟฟ้าที่รักษาสภาพซึ่งโครโนซ์ให้แก่ระบบไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าจำนวนนี้ทำให้หวัตรจักร  $G_n$  มีความเร่งลดลงมาเป็น  $\omega$  อันเป็นความเร็วเดิมของระบบไฟฟ้า ตามความจริงแล้วความเร็วรอบของระบบจะเพิ่มขึ้น แต่จะเพิ่มขึ้นน้อยมากจนใกล้เคียงค่าความเร็วของระบบ ดังนั้นในทางปฏิบัติถือว่าค่ายังคงเดิมตามคุณสมบัติของบัสอนันต์ สมการทางไฟฟ้าเป็นดังนี้

เมื่อ  $\omega_n$  มากกว่า  $\omega$

$$\bar{E}_{sy} = \bar{E}_{fn} - \bar{V} \quad (2.11)$$

เมื่อ  $\omega$  มากกว่า  $\omega_n$

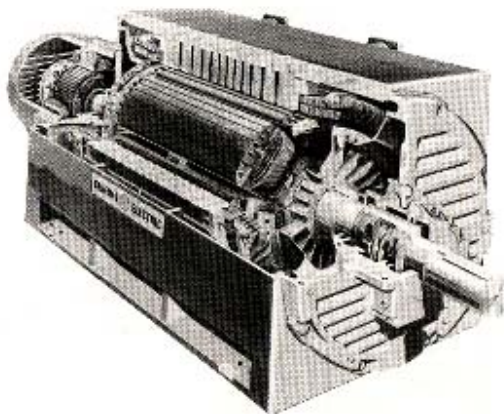
$$\bar{E}_{sy} = \bar{V} - \bar{E}_{fn} \quad (2.12)$$

ส่วนกระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า และแรงบิดที่รักษาภาพซึ่งโครโนซ์เหมือนในสมการที่ (2.9) , (2.10) และ (2.7) แต่เปลี่ยนจาก  $Z_{s2}$  เป็น  $Z_{sn}$  และ  $E_{f2}$  เป็น  $E_{fn}$  และความถี่ของระบบยังคงเป็น  $\omega$

## 2.4 มอเตอร์ซึ่งโครโนส [8]

มอเตอร์ซึ่งโครโนสหรือซึ่งโครโนสมอเตอร์ เป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับแบบหนึ่งที่มีคุณสมบัติเด่นคือมีความเร็วคงที่ ความเร็วรอบของมอเตอร์แบบนี้จะหมุนด้วยความเร็วซึ่งโครโนสตลอดเวลา ไม่ว่า

โหลดจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างไรก็ตาม (เมื่อขับโหลดที่ไม่เกินพิกัดกำลังของเครื่อง) จึงนิยมใช้ในงานที่ต้องการความเร็วรอบคงที่เช่น โรงงานสิ่งทอ โรงงานรีดยาง โรงงานรีดเหล็ก และโรงงานปูนซีเมนต์ เป็นต้น



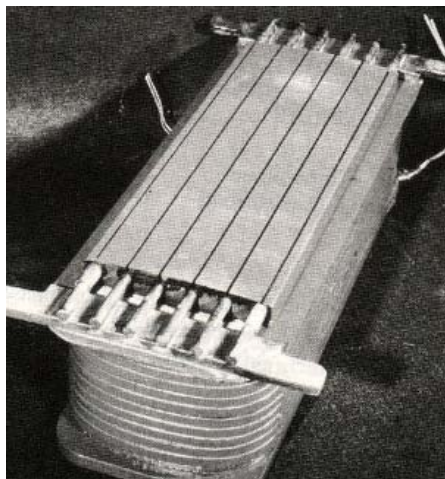
รูปที่ 2.10 มอเตอร์ซิงโครนัส

นอกจากคุณสมบัติที่ดีดังกล่าว มอเตอร์ซิงโครนัสยังสามารถใช้ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง หรือค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ในระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่ได้เช่นเดียวกับการใช้เพาเวอร์คาปาซิเตอร์ เช่นเดียวกับเครื่องกลไฟฟ้าอื่น ๆ ที่ทำงานโดยการหมุนมอเตอร์ซิงโครนัสจึงสามารถทำงานเป็นได้ทั้งมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับอีกด้วย

### โครงสร้างและส่วนประกอบ

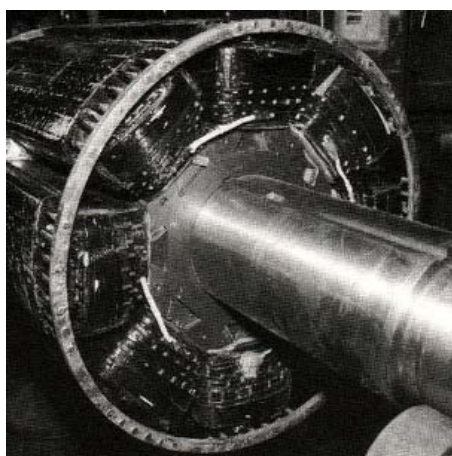
มอเตอร์ซิงโครนัส มีส่วนประกอบเหมือนกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสแบบขั้วแม่เหล็กยื่น (Salient pole) จึงมีส่วนประกอบดังนี้

**สเตเตอร์** ประกอบด้วยแกนเหล็กลามิเนต เซาะด้านในเป็นร่องสำหรับพันขดลวดอัดยึดกับโครงที่ทำด้วยเหล็กหล่อเหนียว ขดลวดที่พันในร่องเป็นขดลวดสามเฟสเรียกขดลวดที่สเตเตอร์นี้ว่า “ขดลวดอาเมเจอร์” ลักษณะของสเตเตอร์ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ขดลวดสเตเตอร์มอเตอร์ซิงโครนัส

โรเตอร์ เป็นแบบขั้วแม่เหล็กยื่น (Salient pole) ทำด้วยเหล็กแผ่นลามิเนตนำมาอัดยึดกับแกนของโรเตอร์รอบ ๆ ขั้วแม่เหล็กทุก ๆ ขั้วจะพันขดลวดสนามแม่เหล็กและต่ออนุกรมกันให้เป็นขั้วได้สลับกันไฟ จะเหลือปลายสองปลายนำไปต่อเข้ากับสลีป-ริง (Slip Ring) 2 อันที่ติดอยู่กับเฟลาของโรเตอร์ ด้านหน้าของขั้วแม่เหล็กยื่นแต่ละขั้วจะฝังขดลวดอีกชุดหนึ่งเรียกว่า “ขดลวดแดมเปอร์” (Damper Winding) หรือ “ขดลวดอะมอร์ติซเซอร์” (Amortisseur Winding) วางขนานกับเฟลา ขดลวดชุดนี้มีไว้สำหรับการเริ่มเดินมอเตอร์ และช่วยแก้ปัญหาเรื่องการสั่นของโรเตอร์ด้วย ดังรูป 2.20



รูปที่ 2.12 โรเตอร์มอเตอร์ซิงโครนัส

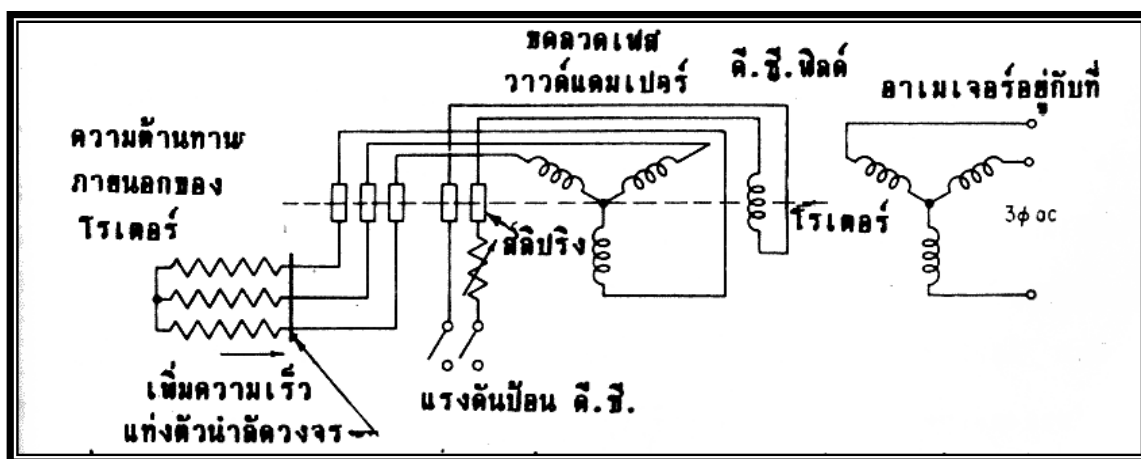
เอ็กไซเตอร์ (Exciter) โดยปกติมอเตอร์ซิงโครนัส จะต้องใช้แหล่งจ่ายไฟเลี้ยงวงจรอยู่ 2 แห่ง แห่งแรกคือ ขดลวดที่สเตเตอร์ จะต้องใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส ป้อนเข้าเพื่อทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุน (Rotating Field) และอีกแห่งหนึ่งคือ ขดลวดสนามแม่เหล็กที่โรเตอร์ จะต้อง

ใช้แรงดันไฟฟ้ากระแส ตรงป้อนเข้าเพื่อให้เกิดอำนาจแม่เหล็ก เป็นขั้วเหนือ- ได้สลับกับแหล่งจ่าย ไฟฟ้ากระแสตรงอาจได้มาจากเครื่องกำเนิดไฟตรงแบบกระตุ้นตัวเอง (Self-excited d.c. Generator) ซึ่ง จะติดตั้งอยู่บนเพลาดียวกับมอเตอร์ซิงโครนัส เรียกว่า “เอ็กไซเตอร์” (Exciter)

### วิธีการเริ่มเดิน (Method of starting)

เนื่องจากมอเตอร์ซิงโครนัส ไม่สามารถเริ่มหมุนได้ด้วยตัวเองดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาวิธีการที่จะทำให้ มันเริ่มหมุน โดยทั่วไปมี 2 วิธี คือเริ่มเดินโดยหลักการเหนี่ยวนำ (Induction Start) ใช้หลักการเกี่ยวกับการเริ่มเดินมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยการฝังขดลวดแคมเปอร์ (Amortisseur Winding หรือ Damper Winding) ไว้ใกล้ผิวหน้าของขั้วแม่เหล็กบนโรเตอร์ ตามปกติขดลวดสนามแม่เหล็กควรจะต้องกับ Field Discharge Resistor (F.D.R.) เสียก่อน เมื่อจ่ายไฟสามเฟสเข้าขดลวดสเตเตอร์จะเกิด สนามแม่เหล็กหมุน ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นและมีกระแสไหลในขดลวดแคมเปอร์ ทำให้เกิดขั้วแม่เหล็กขึ้นที่โรเตอร์ หมุนตามการหมุนของขั้วแม่เหล็กหมุนที่สเตเตอร์ เมื่อโรเตอร์หมุน ไปและมีความเร็วต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัสเล็กน้อย จึงจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเข้าขดลวดสนามแม่เหล็ก บนโรเตอร์ ขั้วแม่เหล็กที่โรเตอร์จะดึงดูด (Inter-locking) กับขั้วแม่เหล็กหมุนที่สเตเตอร์ และจะหมุน ด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วซิงโครนัส ข้อควรระวัง ขณะสตาร์ทมอเตอร์ซิงโครนัส ต้องต่อความ ต้านทานค่าสูงคร่อมขดลวดสนาม แม่เหล็ก เพราะว่าจะเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มี ค่าสูงมากขึ้นที่ขดลวดชุดนี้อาจจะเป็นอันตรายกับบุคคลที่เข้าไปทำงานกับมอเตอร์ หรือทำให้ฉนวน ของขดลวดสนามแม่เหล็กชำรุดได้ ความต้านทานตัวนี้เรียกว่า “field discharge resistor” (F.D.R.)

เนื่องจากขดลวดแคมเปอร์ที่ฝังไว้ด้านหน้าของขั้วแม่เหล็กบนโรเตอร์มีค่าความต้านทาน ( $R_2$ ) ต่ำ และ มีค่า Standstill Reactance ( $X_2$ ) สูง จึงเป็นผลให้มอเตอร์มีแรงบิดเริ่มหมุน (Starting Torque) ต่ำ อาจจะแก้ไขได้โดยใช้โลหะผสมที่มีค่า  $R_2$  สูง (High Resistivity Alloys) แต่มีข้อเสียคือทำให้สลีป เพิ่มขึ้น การดึงดูดกันระหว่างขั้วแม่เหล็กบนโรเตอร์กับขั้วแม่เหล็กของสนามแม่เหล็กหมุน (revolving field) จะไม่ดีพอวิธีที่ดีกว่าทำได้โดยใช้ขดลวดวาวด์โรเตอร์ (Wound Rotor Winding) แทนขดลวด แคมเปอร์เรียกกันโดยทั่วไปว่า “Phase Wound Damper Winding” โดยออกแบบให้มีสลีป-ริง จำนวน 5 อัน 2 อันสำหรับขดลวดสนามแม่เหล็กและอีก 3 อันสำหรับขดลวดวาวด์โรเตอร์ 3 เฟสต่อแบบ สตาร์ (Wye-Connected Wound Rotor Winding) ซึ่งลักษณะในการเริ่มเดินของ “Phase Wound Damper” หรือ “Simplex Rotor” จะคล้ายคลึงกับการเริ่มเดินมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบ วาวด์โรเตอร์ (Wound Rotor Induction Motor) มากที่สุด ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แสดงวงจรของมอเตอร์ซิงโครนัสแบบเฟสวาวด์แคมเปอร์ (Phase Wound Damper) และเรียกโรเตอร์ของมอเตอร์แบบนี้ว่า ซิมเพล็กซ์โรเตอร์ (Simplex Rotor)

มอเตอร์จะถูกสตาร์ทโดยมีความต้านทานภายนอก (Starting Resistor) ต่ออนุกรมอยู่กับ Phase Wound damper winding โดยวงจรฟิลด์จะถูกตัดวงจร (ผ่าน Field Discharge Resistor) เมื่อมอเตอร์มีความเร็วใกล้ความเร็วซิงโครนัสจึงค่อย ๆ ลดค่าความต้านทานลง ในขณะเดียวกันก็จ่ายไฟ D.C. ให้แก่วงจรฟิลด์ มอเตอร์ก็จะเข้าสู่ความเร็วซิงโครนัส (Synchronism) การสตาร์ทมอเตอร์ซิงโครนัส โดยวิธีนี้จะได้แรงบิดเริ่มหมุน (Starting Torque) สูงประมาณ 3 เท่าของแรงบิดเมื่อโหลดเต็มพิกัด (Full Load Torque) ใช้ต้นกำลัง (Prime Mover) จากภายนอกหรืออาจจะใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงต่อโดยตรงกับเพลของมอเตอร์ซิงโครนัส แล้วจ่ายไฟ D.C. เข้าขดลวดสนามแม่เหล็กจนกระทั่งได้แรงดันไฟฟ้าออกมาเท่ากับพิกัด ตรวจสอบลำดับเฟสให้ถูกต้อง แล้วทำการขนานมอเตอร์ซิงโครนัสซึ่งในขณะนี้ทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัส เข้ากับ bus bar โดยใช้หลอดไฟ (Phasing Lamps) หลังจากนั้นก็ปลดต้นกำลังออกหรือตัดแหล่งจ่ายไฟของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัส เครื่องกำเนิดจะทำงานเป็นมอเตอร์ซิงโครนัส สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงก็จะทำหน้าที่เป็นโหลดของมอเตอร์ซิงโครนัสต่อไป

## 2.5 มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส [8][10]

มอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นมอเตอร์ที่นิยมใช้มากที่สุด ซึ่งมอเตอร์ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำนี้อาจเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว หรือมอเตอร์เหนี่ยวนำหลายเฟส (Poly Phase Induction Motor) ก็ได้ มอเตอร์เหนี่ยวนำหลายเฟสนั้นโดยมากแล้วจะเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ซึ่งมีข้อดี และข้อด้อยคือ

### ข้อเด่น (Advantage)

1. เป็นมอเตอร์ชนิดที่สร้างขึ้นได้ง่าย และ ทนทาน โดยเฉพาะชนิดกรงกระรอก (Squirrel-cageType)
2. ราคาไม่แพง และไม่เสียง่าย
3. มีประสิทธิภาพที่สูงพอในสภาวะที่มอเตอร์หมุนปกติ ไม่มีแปรงถ่านดังนั้นการสูญเสียเนื่องจากความฝืดจึงลดลงหรือมีค่าน้อยมาก และมีเพาเวอร์แฟกเตอร์ดี
4. ต้องการการดูแล และบำรุงรักษาคำ
5. สามารถที่จะเริ่มหมุน(Start) ได้ง่าย โดยเฉพาะชนิดกรงกระรอก

### ข้อด้อย (Disadvantage)

1. ความเร็วรอบของมอเตอร์ไม่สามารถที่จะเปลี่ยนแปลงได้อันเนื่องมาจากความถี่หลักมูลของแรงดันไฟฟ้าสลับที่จ่ายให้กับมอเตอร์ไม่สามารถปรับเปลี่ยนได้
2. มีคุณสมบัติเหมือนกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบซันด์ ความเร็วรอบจะลดลงหรือเพิ่มขึ้นจะขึ้นอยู่กับโหลด
3. แรงบิดในขณะเริ่มหมุนของมอเตอร์เหนี่ยวนำค่อนข้างต่ำกว่าแรงบิดขณะเริ่มหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบซันด์

เป็นมอเตอร์ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากความเร็วรอบ ค่อนข้างคงที่ การซ่อมแซมและบำรุงรักษาทำได้ง่ายมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส แบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ

- แบบโรเตอร์กรงกระรอก
- แบบโรเตอร์พันขดลวด หรือ แบบวาวด์โรเตอร์



รูปที่ 2.14 มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสโรเตอร์กรงกระรอก

มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส มีส่วนประกอบที่สำคัญ 2 ส่วน คือ

1. ตัวอยู่กับที่หรือสเตเตอร์ ( stator ) ประกอบด้วย

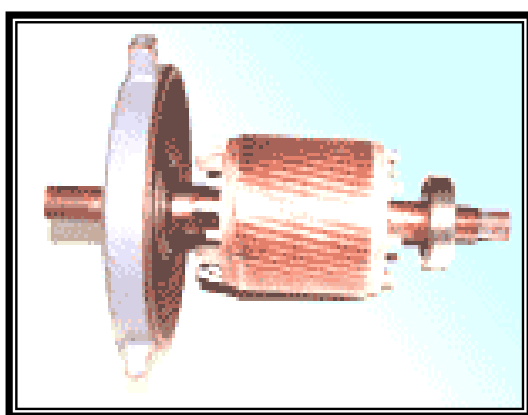
- โครงสเตเตอร์ ทำด้วยเหล็กหล่อรูปทรงกระบอกกลวง ผิวด้านนอกของมอเตอร์บางตัวจะออกแบบเป็นครีป เพื่อช่วยระบายความร้อน

- แกนสเตเตอร์ ทำด้วยแผ่นเหล็กบาง ๆ ด้านในเป็นร่องสำหรับพันขดลวด

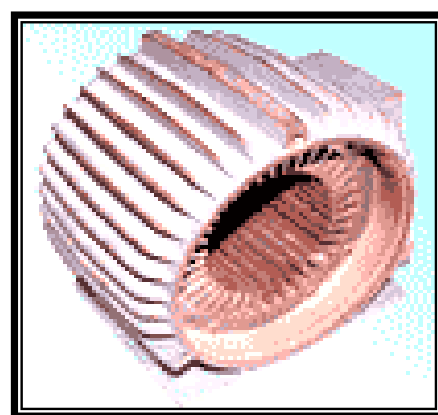
- ขดลวดสเตเตอร์ คือขดลวดทองแดงเคลือบฉนวน สำหรับพันลงในร่องของแกนสเตเตอร์

2. ตัวหมุนหรือโรเตอร์ ( rotor ) แบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ

- โรเตอร์แบบกรงกระรอก มีลักษณะคล้ายกรงกระรอก

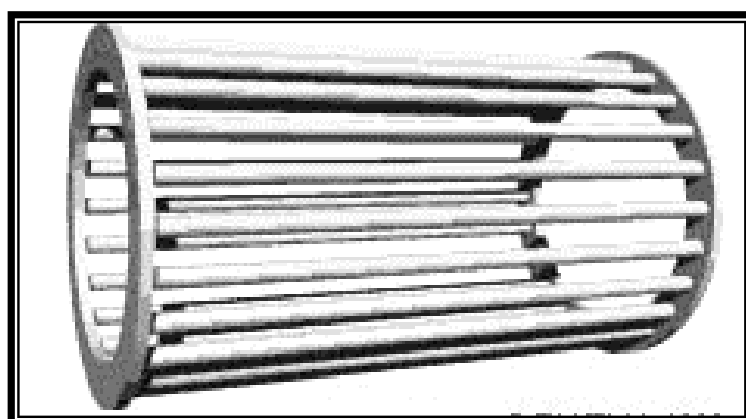


ก. รูปโรเตอร์แบบกรงกระรอก



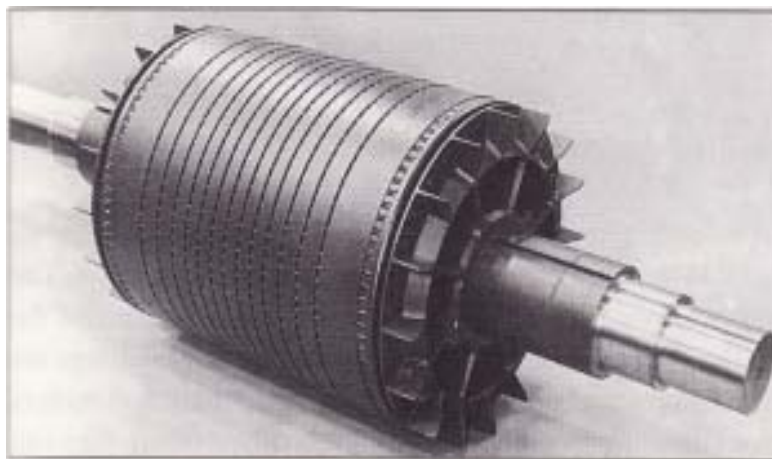
ข. รูปสเตเตอร์ของอินดักชันมอเตอร์

รูปที่ 2.15 รูปโรเตอร์แบบกรงกระรอก และสเตเตอร์ของอินดักชันมอเตอร์



รูปที่ 2.16 โครงสร้างภายในของโรเตอร์แบบกรงกระรอก

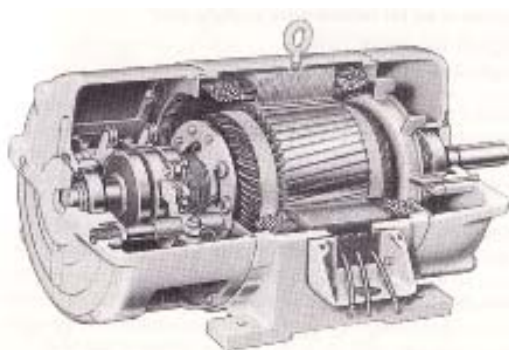
โครงสร้างภายในของโรเตอร์แบบกรงกระรอก ประกอบด้วยแท่งทองแดงและวงแหวนทองแดงสองวง



รูปที่ 2.17 โรเตอร์แบบกรงกระรอกของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาดกลาง  
แบบสนามแม่เหล็กหมุน ( The rotating field )

#### โรเตอร์แบบฟันขดลวด หรือ แบบวาวด์โรเตอร์

อินดักชันมอเตอร์ชนิดนี้ตัวโรเตอร์จะทำจากเหล็กแผ่นบางๆ อัดซ้อนกันเป็นตัวหุ่นคล้ายๆ อาร์เมเจอร์ ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง มีร่องสำหรับวางขดลวดของตัวโรเตอร์เป็นขดลวด 3 ชุด สำหรับสร้างขั้วแม่เหล็ก 3 เฟสเช่นกันปลายของขดลวดทั้ง 3 ชุดต่อกับสปริง (Slip Ring ) จำนวน 3 อัน สำหรับเป็นทางให้กระแสไฟฟ้าครบวงจรทั้ง 3 เฟสการทำงานของอินดักชันมอเตอร์ เมื่อจ่ายไฟฟ้าสลับ 3 เฟสให้ที่ขดลวดทั้ง 3 ของตัวสเตเตอร์จะเกิดสนามแม่เหล็กหมุนรอบๆ ตัวสเตเตอร์ ทำให้ตัวหมุน (โรเตอร์) ได้รับการเหนี่ยวนำทำให้เกิดขั้วแม่เหล็กที่ตัวโรเตอร์ และขั้วแม่เหล็กนี้ จะพยายามดึงดูดกับสนามแม่เหล็กที่หมุนอยู่รอบๆ ทำให้มอเตอร์ของอินดักชันมอเตอร์หมุนไปได้ ความเร็ว ของสนามแม่เหล็กหมุนที่ตัวสเตเตอร์นี้จะคงที่ตามความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับ ดังนั้นโรเตอร์ของอินดักชัน ของมอเตอร์จึงหมุนตามสนามหมุนดังกล่าวไปด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วเท่ากับความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุน



รูปที่ 2.18 ภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบวาวด์โรเตอร์

## 2.6 ความแตกต่างระหว่างมอเตอร์ซิงโครนัสกับ มอเตอร์เหนี่ยวนำ [1]

ซิงโครนัสมอเตอร์ที่มีพิกัดต่ำกว่า 50 แรงม้าและมีความเร็วรอบในย่านปานกลาง คือ สูงกว่า 600 rpm จะไม่ค่อยพบในการใช้งานมากนัก ทั้งนี้ก็เพราะว่าที่พิกัดแรงม้าและความเร็วรอบในย่านดังกล่าวนี้ซิงโครนัสมอเตอร์จะมีราคาสูงกว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำหลายเท่าทั้งยังจะต้องมีแหล่งจ่ายไฟตรง สำหรับ การกระตุ้นฟิลด์โดยเฉพาะ อีกทั้งอุปกรณ์ช่วยสตาร์ทและควบคุมก็มีราคาแพงกว่ายิ่งถ้าต้องการระบบ ที่เป็นอัตโนมัติด้วยแล้ว ราคาจะยิ่งแพงมากขึ้น อย่างไรก็ตามซิงโครนัสมอเตอร์ก็มีสิ่งที่ดีๆที่ดึงดูดใจให้น่ามาใช้งานที่ต้องใช้พิกัดสูงๆแต่ใช้ ย่าน ความเร็วรอบต่ำ (ต่ำกว่า 300 rpm) เพราะที่ความเร็วรอบในย่านนี้ ถ้าใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำ ประสิทธิภาพและเพาเวอร์แฟคเตอร์ จะต่ำมาก ขนาด น้ำหนัก และราคาก็สูงกว่าด้วย ส่วนซิงโครนัสมอเตอร์นั้นเนื่องจากค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์สามารถควบคุมและปรับให้มีค่าเป็น 1 ได้ ทำให้มีประสิทธิภาพสูง และแม้ว่าการสร้างซิงโครนัสมอเตอร์ค่อนข้างจะซับซ้อนกว่า ก็ตามแต่ที่พิกัดกำลังเท่ากันและความเร็วรอบต่ำๆซิงโครนัสมอเตอร์จะมีขนาดน้ำหนักและราคา ต่ำกว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำ ทำให้การนำซิงโครนัสมอเตอร์มาใช้ในงานที่ต้องการพิกัดกำลังสูงๆ แต่ย่านความเร็วรอบต่ำและคงที่เป็นไปอย่างกว้างขวาง

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ไชยชาญ หินเกิด [1] ได้อ้างถึง ไมเคิล ฟาราเดย์ [1] ได้ทำการทดลองและค้นพบความจริงเกี่ยวกับการเหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าในขดลวดตัวนำเมื่อมีสนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงตัดกับขดลวดตัวนำนั้น และได้ความรู้จากการทดลอง คือ การเหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าทำได้ 2 วิธี

ก. โดยให้ขดลวดตัวนำเคลื่อนที่ตัดสนามแม่เหล็กซึ่งอยู่กับที่ นำหลักการนี้ไปประยุกต์ใช้ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง และเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับแบบอามเจอร์หมุน

ข. โดยให้สนามแม่เหล็ก เคลื่อนที่ตัดขดลวดตัวนำซึ่งอยู่กับที่ นำหลักการนี้ไปประยุกต์ใช้ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับแบบขั้วแม่เหล็กหมุน

รัชชัย อติบุญกุล [4] ได้ค้นพบว่า ขณะที่มีมอเตอร์เหนี่ยวนำกำลังหมุนตามปกติ ถ้าใช้วิธีทางกลเข้าช่วยขับเคลื่อนโรเตอร์ของมอเตอร์ให้หมุนเร็วกว่าความเร็วปกติเข้าสู่ความเร็วซิงโครนัส (Supersynchronous Speed) สลิปจะมีค่าติดลบ มอเตอร์จะเปลี่ยนหน้าที่กลับกลายเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยเปลี่ยนกำลังกลที่ป้อนให้ที่เพล่า เป็นกำลังไฟฟ้าส่งกลับเข้าสู่แหล่งจ่ายไฟ A.C. หรือ A.C. network ดังนั้นถ้าเราต่อเส้นกราฟออกไปในทิศทางที่มีความเร็วสูงกว่าความเร็วซิงโครนัส เข้าสู่บริเวณปฏิบัติงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator Region) คือบริเวณเส้นกราฟเริ่มจากสลิปเท่ากับ ศูนย์ ถึงสลิปเท่ากับ -1