

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 หลักการและเหตุผล

เทคโนโลยีการคมนาคมของรถไฟฟ้าได้ถูกพัฒนาขึ้นเรื่อยๆ มาอย่างต่อเนื่อง จากเครื่องจักรไอน้ำจนปัจจุบันนี้ใช้ระบบขับเคลื่อนด้วยเครื่องยนต์และไฟฟ้า ที่มีความเร็วสูงถึง 500 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ซึ่งถูกพัฒนาโดยประเทศญี่ปุ่น และล่าสุดในการรถไฟแห่งประเทศไทยก็เริ่มก่อสร้าง โครงการรถไฟฟ้าในเขตกรุงเทพมหานครแล้ว รถไฟฟ้าได้ถูกพัฒนาขึ้นโดยใช้หลักการของเส้นแรงแม่เหล็ก ความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กและการนำกระแสของตัวนำ ตามกฎของแอมแปร์ (Ampere's Law) หรือ สมการแรงของลอเรนซ์ (Lorentz Force Equation) ทำให้เกิดแรงและการเคลื่อนที่

เพื่อให้สอดคล้องกับเทคโนโลยีของรถไฟฟ้าที่ได้พัฒนาขึ้นนี้ จึงได้จัดทำโครงการเพื่อศึกษาระบบพื้นฐานของรถไฟฟ้า หลักการทำงานเบื้องต้น โดยใช้หลักการของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเชิงเส้น (Linear Induction Motor) ซึ่งเป็นอีกรูปแบบหนึ่งของรถไฟฟ้าที่มีอยู่ในปัจจุบัน

สืบเนื่องจาก โครงการงานของรุ่นปี 2000 แล้ว ได้ออกแบบมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเชิงเส้นแต่ยังประสบปัญหาต่างๆ คือ ปัญหาทางด้านโครงสร้าง ได้แก่ การเคลื่อนที่ติดขัดในช่วงของทางโค้ง และระบบจ่ายพลังงานมีการชำรุดเสียหาย ปัญหาทางด้านระบบวงจรไฟฟ้า ได้แก่ ระบบไฟฟ้าที่จ่ายให้กับ model เป็นระบบไฟฟ้าแบบ 3 เฟสไม่สะดวกต่อการนำไปใช้งานจริง ดังนั้นจึงมีการศึกษาและออกแบบ Converter เพื่อนำมาแปลงระบบไฟฟ้าจากแรงดันแบบเฟสเดียวให้เป็นแรงดัน 3 phase เพื่อให้นำไปใช้งานที่ต่างๆ ได้

#### 1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาและปรับปรุงการทำงานของ Linear Induction Motor Model
2. เพื่อปรับปรุงระบบส่งกำลังไฟฟ้าของ Model
3. เพื่อปรับปรุงรางและโครงสร้างของ Model
4. ศึกษาและออกแบบ converter 3 เฟส ปรับความถี่ได้

#### 1.3 ขอบข่ายของงาน

1. ปรับปรุงโครงสร้างของ Induction Motor และออกแบบ Model
2. ปรับปรุง ชุดปฐมภูมิ (ตัวรถ) และ ชุดทุติยภูมิ (ราง)
3. สร้าง converter เพื่อใช้ในการควบคุมความเร็ว

#### 1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. เรียนรู้หลักการการทำงานของ Linear Induction Motor
2. เรียนรู้หลักการการทำงานของ converter ที่ใช้ในการแปลงไฟฟ้าจากระบบไฟ 1 เฟส ให้เป็นระบบ 3 เฟส ชนิดปรับความถี่ได้
3. ได้ทดลองประกอบตัวรถไฟฟ้าที่สามารถทำงานได้จริง
4. ได้ชุดสาธิตระบบของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเชิงเส้น
5. สามารถนำโครงงานนี้ไปประยุกต์ใช้ในงานอื่น ๆ ได้

## บทที่ 2

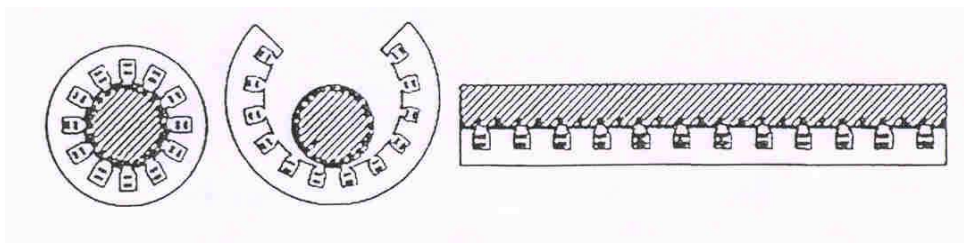
### ความรู้พื้นฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ในทางปฏิบัติเครื่องจักรไฟฟ้าชนิดหมุน (Rotating machine) จะมีการหมุนของสนามแม่เหล็ก และเหนี่ยวนำให้ส่วนของโรเตอร์หมุนไปทางเดียวกัน แต่ในเครื่องจักรที่มีการเคลื่อนที่แบบเชิงเส้น มีการเคลื่อนที่แบบเชิงเส้นซึ่งเรียกวาระบบการเคลื่อนที่เชิงเส้นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Linear motion electromagnetic system ; LMES) โดยมีลักษณะการเคลื่อนที่ของส่วนหนึ่งเทียบกับอีกส่วนหนึ่งในแนวนอน และส่วนใหญ่นิยมเรียกแรงที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ในแนวนอนนี้ว่า แรงขับเคลื่อน (Thrust force) และเรียกแรงที่อยู่ในแนวตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ว่า แรงตั้งฉาก (Normal force) จากคุณสมบัติของระบบเคลื่อนที่เชิงเส้นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า จะประกอบด้วยแรงขับเคลื่อนและแรงตั้งฉากจึงถูกนำไปใช้เป็นมอเตอร์ (Motor) มากกว่าเป็นเจนเนอเรเตอร์ (Generator)

เมื่อลักษณะโครงสร้างของเครื่องจักรไฟฟ้าเปลี่ยนไป คุณลักษณะ คุณสมบัติ การทำงานและวิธีการออกแบบ จะต้องเปลี่ยนไปด้วย ดังนั้นวิธีการวิเคราะห์แบบต้องคำนึงถึงโครงสร้างด้วย

#### 2.1 ความแตกต่างพื้นฐานระหว่างเครื่องจักรไฟฟ้าแบบเชิงเส้นกับแบบชนิดหมุน

ทฤษฎีต่างๆเกี่ยวกับ Linear induction motor (LIM) คร่ำยกับทฤษฎีของเครื่องจักรไฟฟ้าแบบชนิดหมุน ดังนั้นการจะศึกษาเกี่ยวกับเครื่องจักรแบบเชิงเส้นนั้น จะใช้ผลที่ได้จากเครื่องจักรชนิดหมุนมาผ่าแล้ว คลี่ออกเป็นแผ่นราบ ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างการประยุกต์ เครื่องจักรไฟฟ้าชนิดหมุนเป็นแบบเชิงเส้น

ก่อนที่จะนำทฤษฎีของเครื่องจักรไฟฟ้าแบบชนิดหมุนมาใช้ในการออกแบบนั้น จะต้องศึกษาถึงความแตกต่างของเครื่องจักรที่เกิดจากการผ่าคัลล์ออกและดูผลที่เกิดขึ้น เพื่อปรับปรุงระบบให้มีประสิทธิภาพและนำมาใช้งานได้ตามต้องการ ในที่นี้จะพิจารณาเฉพาะมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบหลายเฟส (Poly phase induction motor) เท่านั้น

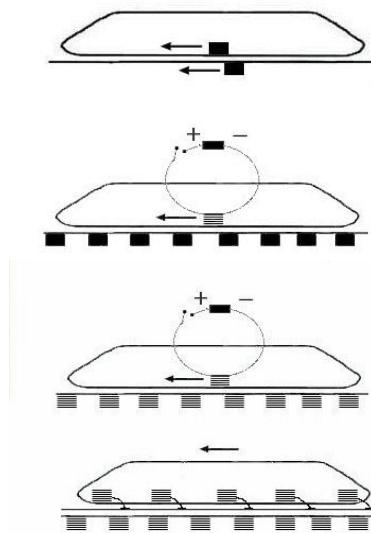
แรงที่เกิดขึ้นบนตัวเครื่องจักรไฟฟ้า โดยปกติแรงที่เกิดขึ้นบนตัวมอเตอร์จะมี 2 แบบ คือ แรงแม่เหล็ก (Magnetic force) และแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic force) ซึ่งอธิบายแต่ละชนิดดังนี้

### 2.1.1 แรงสนามแม่เหล็ก

แม่เหล็กถาวรกับวัสดุที่มีสภาพเป็นแม่เหล็กจะดูดติดกัน หรือเกิดแต่แรงดูดเสมอไม่ว่าแม่เหล็กนั้นจะเป็นขั้วเหนือหรือขั้วใต้ และแม่เหล็กถาวรเราสามารถสร้างหรือแทนได้จากขดลวดแม่เหล็กที่ป้อนด้วยไฟตรงหรือกระแสสลับ ดังนั้นเราสามารถสรุปได้ว่าแม่เหล็กที่สร้างจากไฟฟ้า จะเกิดเฉพาะแรงสนามแม่เหล็กเท่านั้น

### 2.1.2 แรงสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

สามารถอธิบายได้จากการใช้ขดลวดตัวนำ 2 ขด โดยที่ขดหนึ่งป้อนด้วยไฟฟ้ากระแสสลับและอีกขดหนึ่งลัดวงจร (Short circuit) จะเกิดแรงผลักกันขึ้นระหว่างขดลวดทั้งสอง เนื่องจากขดลวดที่ถูกลัดวงจรจะถูกเหนี่ยวนำโดยฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic flux) ที่เกิดจากไฟฟ้ากระแสสลับ จากขดลวดอีกขดหนึ่ง ทำให้เกิดกระแสไหลในทิศทางตรงกันข้าม และลักษณะของแรงที่เกิดขึ้นนี้จะเรียกว่า แรงสนามแม่เหล็กไฟฟ้า



รูปที่ 2.2 แสดงแรงสนามแม่เหล็ก

ลักษณะการเกิดแรงดูดได้จากรูปที่ 2.2 ซึ่งจะเห็นความแตกต่างระหว่างแรงสนามแม่เหล็กกับแรงสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และเมื่อนำมาพิจารณาในเครื่องจักรไฟฟ้าแบบเชิงเส้น จะเห็นว่าแรง

ที่เกิดจากสนามแม่เหล็กจะพยายามดึงโรเตอร์ (Rotor) กับสเตเตอร์ (Stator) เข้าหากัน ทำให้เกิดแรงทางกลที่ตัวแม่เหล็กกับสเตเตอร์

สำหรับแรงที่เกิดจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ทำให้เกิดการผลักรันระหว่างขดลวดของโรเตอร์จะเกิดแรงสนามแม่เหล็กเช่นกัน โดยจะเกิดในแนวรัศมี ทำให้แรงจากสนามแม่เหล็กหักล้างกับแรงที่เกิดจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า แต่ยังคงเหลือแรงที่เกิดจากสนามแม่เหล็กอยู่บ้าง

การทำให้เครื่องกลไฟฟ้าแบบเชิงเส้นเคลื่อนที่ได้อีกวิธีหนึ่งก็คือ ใช้ล้อเพื่อแยกไม่ให้โรเตอร์กับสเตเตอร์ติดติดกัน และใช้แรงสนามแม่เหล็กไฟฟ้าทำให้เกิดการเคลื่อนที่ แต่จะเกิดปัญหาคือ ถ้าระยะห่างระหว่างสเตเตอร์กับโรเตอร์ห่างกันมาก จะทำให้เกิดการโค้งงอได้ แต่ถ้านำเหล็กที่มีคุณสมบัติทางแม่เหล็กที่ตัวโรเตอร์ออกให้เหลือส่วนที่เป็นตัวนำ ดังนั้นแรงสนามแม่เหล็กจะหายไปและสามารถใช้ตัวนำที่มีลักษณะเป็นแผ่นแทน ก็จะทำให้เกิดแต่แรงผลักรัน จากผลนี้ทำให้เกิดการพัฒนาเป็นเครื่องจักรไฟฟ้าแบบเชิงเส้นที่ไม่ต้องใช้ล้อ เพราะมีแรงที่ทำให้โรเตอร์กับสเตเตอร์แยกจากกันได้

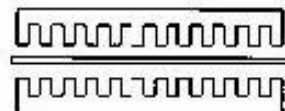
ข้อแตกต่างที่สอง คือ จากรูปที่ 2.1 เห็นได้ว่าเมื่อมีการเคลื่อนที่ในแนวนอน อิทธิพลของสเตเตอร์กับโรเตอร์ที่ปลายด้านหนึ่งจะหมดไป ซึ่งทำให้สนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ (Travelling magnetic field) ที่เกิดบนสเตเตอร์มีลักษณะไม่ต่อเนื่อง ตลอดความยาวของเครื่องจักรไฟฟ้า ทำให้เกิดทรานเซียนท์ (Transient) ขึ้น และเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ผลปลายสุด (End effect) ด้วยเหตุนี้ทำให้คุณลักษณะของเครื่องจักรไฟฟ้าแบบเชิงเส้นแตกต่างจากเครื่องจักรไฟฟ้าแบบชนิดหมุน ทำให้ทฤษฎีของเครื่องจักรไฟฟ้าแบบเชิงเส้นยุ่งยาก แต่อย่างไรก็ตาม เราสามารถละเลยผลปลายสุดได้ เมื่อเครื่องจักรไฟฟ้าแบบเชิงเส้นนั้นมีจำนวนโพลพิช (Pole pitch) ของส่วนที่สั้นมากกว่า 4 โพลพิช แต่ในทางปฏิบัติแล้ว ไม่สามารถทำได้ ดังนั้นผลปลายสุดยังมีอยู่เสมอ

## 2.2 มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเชิงเส้น (Linear Induction Motor)

มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเชิงเส้นที่เป็นที่รู้จักกันมากที่สุด คือ มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเชิงเส้นหลายเฟส ซึ่งในมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบชนิดหมุน สนามแม่เหล็กในช่องว่าง (Air gap) จะเป็นสนามเคลื่อนที่ แต่ในมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเชิงเส้นนั้นจะแตกต่างกันออกไป กล่าวคือ จะประกอบด้วย ส่วนประกอบแรงเคลื่อนที่ด้านหน้า (Forward) ส่วนประกอบแรงเคลื่อนที่ด้านหลัง (Backward) และส่วนประกอบแรงผลักรัน (Pulsating) ซึ่งเกิดมาจากความไม่ต่อเนื่องของวงจรแม่เหล็ก แต่อย่างไรก็ดีส่วนประกอบแรงเคลื่อนที่ด้านหน้ามีบทบาทมากกว่า และเป็นตัวสร้างแรงที่ต้องการ

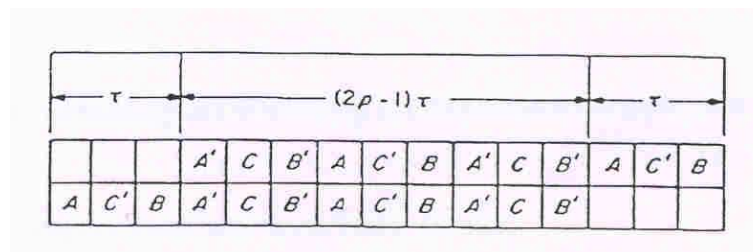
โดยการพิจารณาของปฐมภูมิ (Primary) และทุติยภูมิ (Secondary) แล้ว มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเชิงเส้นอาจเป็นชนิดลัดวงจรทางด้านปฐมภูมิ หรือลัดวงจรทางด้านทุติยภูมิ และอาจมีปฐมภูมิสองข้างหันหน้าเข้าหากัน (Double side ; DSLIM) หรือมีขดปฐมภูมิเพียงข้างเดียว (Single side LIM ; SLIM) ดังแสดงในรูปที่

2.3



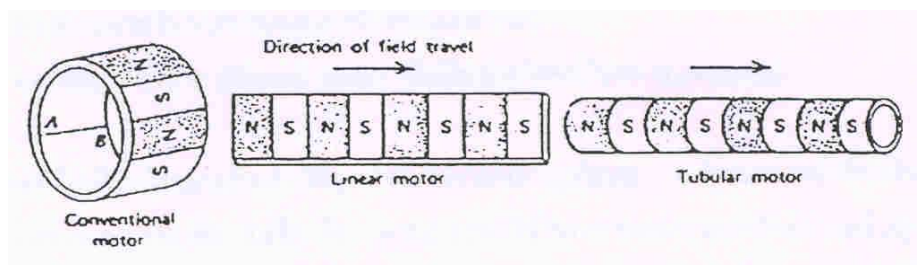
### รูปที่ 2.3 แสดงขดปฐมภูมิ 2 ข้าง และ ขดปฐมภูมิข้างเดียว

มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเชิงเส้นอาจประกอบด้วยทุติยภูมิที่เป็นแผ่นตัวนำ ซึ่งบางครั้งอาจจะประกอบด้วยวัสดุที่มีสภาพเป็นแม่เหล็กไว้ทางด้านหลัง ซึ่งรู้จักกันในชื่อของ แบคไอรอน (Back iron) หรืออาจจะมีลักษณะฝังอยู่บนแท่งตัวนำฝังอยู่บนวัสดุแม่เหล็กซึ่งเรียกว่า แลตเตอร์ (Ladder) ส่วนที่เป็นลักษณะของลวดพันอยู่พบเห็นไม่บ่อยนัก โลหะเหลวอาจนำมาเป็นทุติยภูมิได้ ส่วนปฐมภูมิของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเชิงเส้นอาจมี 1,2 หรือ 3 เฟสก็ได้ และในลักษณะของปฐมภูมิของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเชิงเส้นจะมีการลงขดลวด (Half-filled end slot) ดังรูปที่ 2.4



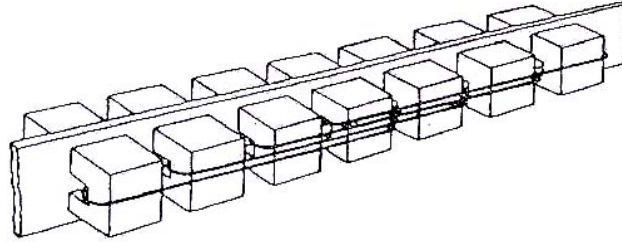
รูปที่ 2.4 การขดลวดปฐมภูมิของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเชิงเส้น

ตามที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นแล้วว่า มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเชิงเส้น ได้มาจากการตัดและคลี่มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเชิงเส้นออก ทำให้เกิดเป็นลักษณะแผ่นราบ (Flat LIM) ถ้าเราม้วนส่วนของฟลัทปฐมภูมิ (Flat primary) รอบแกนที่ขนานไปกับทิศทางการเคลื่อนที่ของสนามแม่เหล็ก ดังแสดงในรูปที่ 2.5 จะได้ลักษณะโครงสร้างที่เป็นทรงกระบอกปลายสุดและสนามแม่เหล็กจะเคลื่อนที่ไปตามรูกลวงของปฐมภูมิ เรียกมอเตอร์ใหม่นี้ว่า เทอร์โบล่ามอเตอร์ (Tubular motor) ข้อได้เปรียบที่เห็นได้ชัดข้อหนึ่งของเทอร์โบล่า คือ ไม่มีผลของปลายสุด (End connection)



รูปที่ 2.5 การพัฒนาของเทอร์โบล่ามอเตอร์

ทั้งฟลัดโพรแมรีและเทอร์โบล่า เป็นจำพวกที่เส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็กอยู่ในทิศทางการเคลื่อนที่ วงจรแม่เหล็กไฟฟ้าอาจดัดแปลงให้ทางเดินของฟลักซ์ (Flux path) อยู่ในแนวตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แกนเหล็กรูปตัวซี ประกอบคู่ (TFLIM) และขดลวดแบบกระจาย

### 2.3 การประยุกต์ใช้งานของระบบเหนี่ยวนำแบบเชิงเส้น

ก่อนที่จะมีมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเชิงเส้นนั้น มอเตอร์แบบเชิงหมุนและอุปกรณ์สำหรับเปลี่ยนการเคลื่อนที่เชิงมุมเป็นการเคลื่อนที่เชิงเส้น เช่น เกียร์, ชุดเฟือง ได้ถูกนำมาใช้ให้เกิดการทำงาน ในแบบเชิงเส้น ข้อดีที่เห็นได้ชัดของมอเตอร์แบบเชิงเส้น คือ ไม่ต้องใช้ชุดเกียร์ ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบกับมอเตอร์แบบเชิงหมุนแล้ว มอเตอร์แบบเชิงเส้นนั้นคงทนและเชื่อถือได้ดีกว่า และมีข้อดีอื่นๆอีก ดังนี้

1. มีอัตราเร่งและอัตราหน่วงสูง และการสึกกร่อนของล้อและทางวิ่งน้อยกว่า
2. การป้องกันทางกล ทางไฟฟ้า และความสามารถในการทนต่อสภาพเลวร้าย
3. ความสะดวกในการซ่อมบำรุงและการสับเปลี่ยน
4. ความสามารถในการสร้างแรงขับเคลื่อน โดยปราศจากการสัมผัสทางกล
5. ความสะดวกในการควบคุมแรงขับเคลื่อนและความเร็ว
6. การที่มีแรงตั้งฉาก (Normal force) ซึ่งเป็นประโยชน์ในการยก (Levitation)

มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเชิงเส้นได้ถูกนำไปใช้งานหลายรูปแบบ แต่ในรูปแบบหนึ่งที่น่าไปใช้กันอย่างกว้างขวางและเป็นที่น่าสนใจ คือ การประยุกต์ใช้ในการขนส่งทางบกด้วยความเร็วสูง หรือความเร็วปานกลาง ในการประยุกต์ใช้งานความเร็วสูง มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเชิงเส้นต้องให้แรงขับเคลื่อนและแรงยก เพื่อยกพาหนะให้ลอยอยู่ในอากาศ หรือในบางตัวอย่างอาจจะใช้เพียงแค่สร้างแรงขับเคลื่อนเท่านั้น และพาหนะถูกรองรับไว้ด้วยล้อหรือเบาะอากาศ (Air cushion) ก็ได้

ลักษณะเฉพาะของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเชิงเส้นสำหรับงานที่ต้องการความเร็วต่ำ คือ ฟลัด แอล โอ เอ็ม ใช้ในงานอุตสาหกรรม ซึ่งถูกนำไปใช้งานที่มีการช่วงการเคลื่อนที่สั้นๆ (Short stroke) มีระยะ 0.5-2 เมตร

## 2.4 การวิเคราะห์แบบประมาณโดยใช้วงจรสมมูลย์

### 2.4.1 แรงในแนวแกน x หาได้ดังนี้

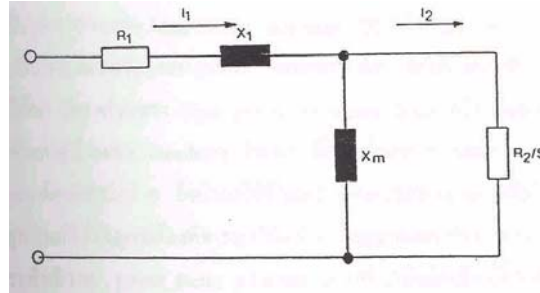
$$\text{จาก } P = \frac{I_2^2 * R_2(1 - s)}{s} \quad (2.1)$$

$$\text{จากสมการ } V = \frac{(1 - s) * N_s * 2\pi}{60} \quad (2.2)$$

ดังนั้นกำลังกลที่เกิดขึ้นที่ตัวมอเตอร์ คือ

$$P = \frac{W}{t} = F_x * V \quad (2.3)$$

เนื่องจากเราหาค่า  $I_2$  ได้ยากเพราะ เราใช้แผ่นอลูมิเนียม ยึดติดกันเพื่อให้ด้าน Rotor เกิดการ short circuit เราจึงใช้  $I_1$  แทนในการหาค่า  $F_x$  ได้จาก วงจรสมมูลย์



รูปที่2.7 วงจรสมมูลย์

$$I_2 = \frac{I_1}{\sqrt{(1/sG_2/s)}} \quad (2.4)$$

นำไปแทนค่า จะได้

$$F_x * N_s(1 - s) = \frac{I_2^2 * R_2(1 - s)}{s} \quad (2.5)$$



### 2.4.2 แรงในแนวตั้งฉาก

แรงในแนวตั้งฉากระหว่างปฐมภูมิกับทุติยภูมิมีส่วนประกอบ 2 ส่วนได้แก่

1. แรงดูด ( $F_{na}$ ) เป็นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นระหว่างแกนเหล็กปฐมภูมิ กับ back iron ของทุติยภูมิ
2. แรงผลัก ( $F_{nr}$ ) เป็นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นระหว่างตัวนำบนปฐมภูมิกับแผ่นตัวนำทุติยภูมิที่มีกระแสไหล

ดังนั้นผลรวมในแนวตั้งฉาก ( $F_n$ ) คือ

$$F_n = F_{na} + F_{nr}$$

ในช่วงที่ slip มีค่าต่ำ หรือวิ่งด้วยความเร็วใกล้เคียง synchronous speed ในแนวตั้งฉากจะเกิดแต่แรงดูด แต่ในขณะที่ช่วง slip มีค่าสูงๆ หรือมอเตอร์เกือบหยุดนิ่ง แรงในแนวตั้งฉากจะเป็นแรงผลัก โดยที่สมการแน่นอน

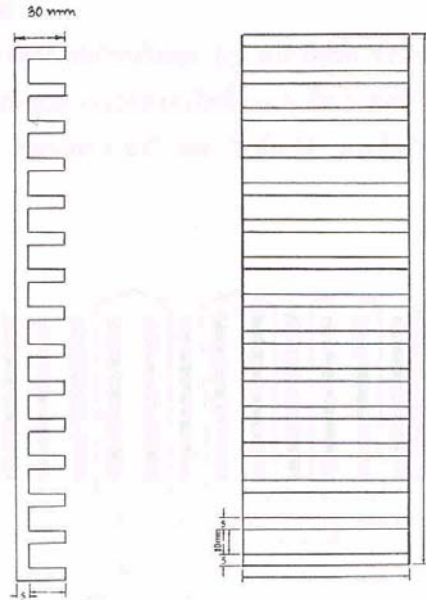
โดยทั่วไปแล้วมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นความเร็วต่ำค่าของ  $G_e$  มีค่าน้อยและลดลงเมื่อ slip มีค่าเพิ่มขึ้นด้วยเหตุนี้เองแรงในแนวตั้งฉากจึงมีแรงดูดเสียส่วนใหญ่

### 2.4.3 ข้อพิจารณาในการออกแบบ

การออกแบบมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้น ค่าพารามิเตอร์นั้นสามารถเปลี่ยนแปลงได้ ซึ่งผลของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์มีผลดังนี้

1. ความกว้างของช่องอากาศ เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญมาก ในการออกแบบเครื่องจักร ช่องว่างอากาศที่กว้างจะต้องการกระแสในการสร้างฟลักซ์แม่เหล็กมากและผลที่ตามมาคือค่า Power Factor ต่ำ ในกรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้น Output force
2. จำนวน pole สามารถลดผลปลายสุดเนื่องจากสนามแม่เหล็กไม่สม่ำเสมอได้โดยการเพิ่มจำนวน pole และยังสามารถเพิ่ม  $N_s$  ได้จาก  $N_s = 120f/p$
3. ขดลวดปฐมภูมิ ในการเปลี่ยนแปลงค่าของสเตเตอร์เมื่อออกแบบให้พื้นที่หน้าตัดของทองแดงใน slot คงที่ เครื่องจักรที่ขดของปฐมภูมิน้อยจะสร้างแรงได้มาก ประสิทธิภาพดี power factor สูงที่เป็นเช่นนี้ทั้งปฐมภูมิและทุติยภูมิมีการรั่วไหลของสนามแม่เหล็กต่ำ แต่การหาขนาดขดของปฐมภูมิจะต้องพิจารณาจากการอิมิตัวของแกนเหล็กที่ใช้ทำปฐมภูมิซึ่งจะเป็นตัวกำหนดความหนาของขดปฐมภูมิ
4. น้ำหนักของปฐมภูมิ(mt) จะเท่ากับ น้ำหนักของขดลวดทองแดง (mc) บวกกับ น้ำหนักของ slot (mi)  $mt = mi + mc$
5. แผ่นทุติยภูมิ แผ่นทุติยภูมิ ต้องกว้างกว่า ปฐมภูมิ เพื่อผลของเสถียรภาพทางด้านข้าง บริเวณริมขอบของปฐมภูมิ ความกว้างของทุติยภูมิ สามารถหาได้จากสมการซึ่ง c คือ semiwidth of secondary a คือ semiwidth of primary z คือ pole pitch

$$c - a = z/\pi \quad (2.6)$$

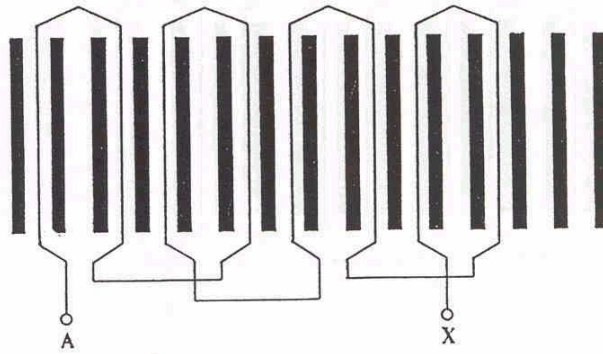


รูปที่ 2.8 แกนเหล็ก

#### 2.4.4 การพันขดลวดใน slot

##### 2.4.4.1 เฟส a

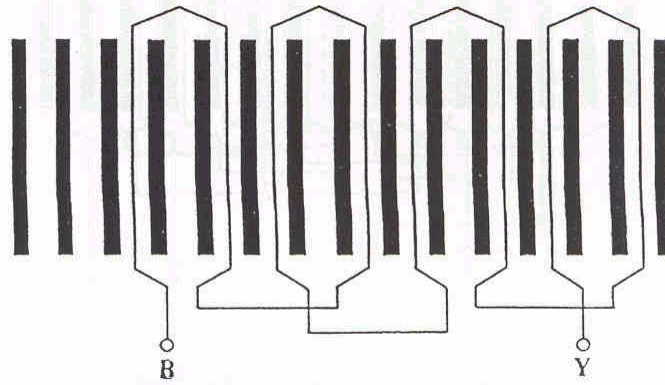
ขดแรกจะลงที่ช่องแรก กับ ช่องที่ 3 ขดที่ 2 ลงที่ช่อง 4 กับ 6 ขดที่ 3 ลงที่ช่อง 7 กับ 9 ขดที่ 4 ลงช่องที่ 10 กับ 12 และลงในลักษณะที่สามแม่เหล็กเสริมกันดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การพันเฟส a

## 2.4.4.2 เฟส b

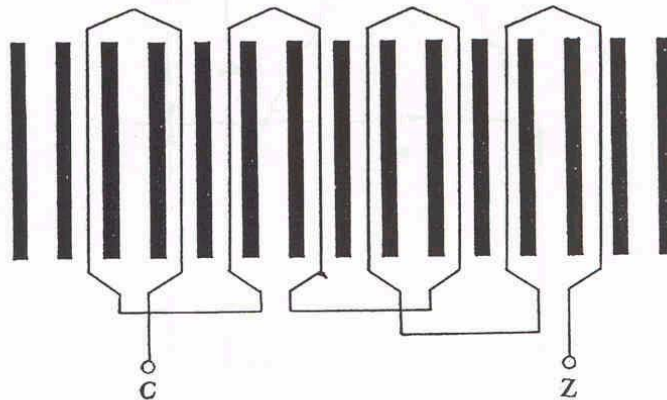
เฟส b จะห่างจากเฟส a เป็นมุม 120 องศาไฟฟ้า ขดแรกจะลงช่องที่ 3 กับช่องที่ 5 ขดที่ 2 ลงช่องที่ 6 กับช่องที่ 8 ขดที่ 3 ลงช่องที่ 9 กับช่องที่ 11 ขดที่ 4 ลงช่องที่ 12 กับช่องที่ 14 ดังรูป



รูปที่ 2.10 การพันเฟส b

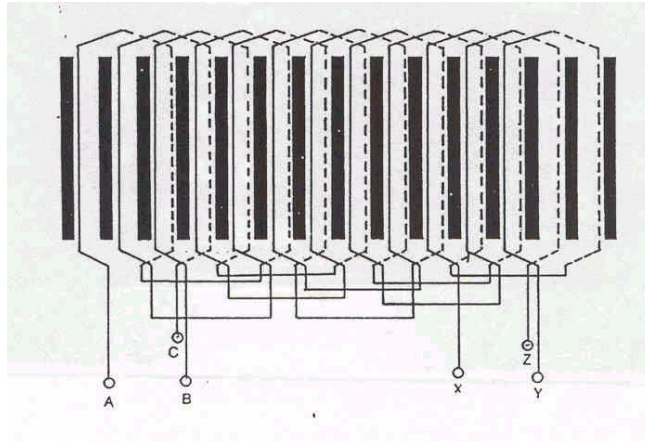
## 2.4.4.3 เฟส c

เฟส c จะห่างจากเฟส b 120 องศาทางไฟฟ้า ขดแรกจะลงที่ช่อง 5 กับช่องที่ 7 ขดที่ 2 ลงช่องที่ 8 กับช่องที่ 10 ขดที่ 3 ลงช่องที่ 11 กับช่องที่ 13 ดังรูป



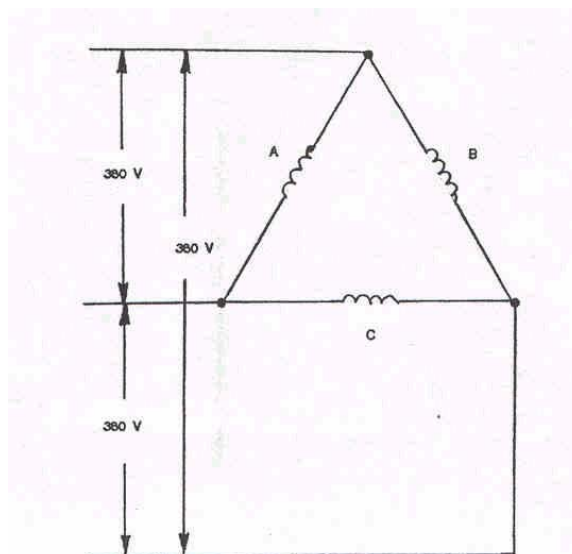
รูปที่ 2.11 การพันเฟส c

เมื่อนำ 3 เฟส มารวมกันจะได้การพันที่สมบูรณ์แบบ เมื่อเรากล่อมอเตอร์ชนิด หมุนออกมาเป็นแผ่นระนาบ จะมีจำนวนทั้งหมด 14 slot โดยจะมี slot ที่มีขีดเพียงชั้นเดียวทั้งหมด 4 slot ที่ปลายทั้ง 2 ข้างของมอเตอร์โดยจะมีข้างละ 2 slot และจำนวนขั้วจะเพิ่มมาเป็น 5 ขั้ว ซึ่งขั้วที่เพิ่มมาเป็นการ พันแบบชั้นเดียว ดังรูป



รูปที่ 2.12 การพันทั้ง 3 เฟส

และต่อแบบเดลต้า เพื่อรับจากแหล่งจ่าย 3 เฟส 220 V ขดลวดถูกออกแบบไว้ ที่ 380 V line to line ดังรูป



รูปที่ 2.13 การต่อแบบเดลตา

## บทที่ 3

### การปรับปรุงระบบรางและโครงสร้าง

#### 3.1 ปัญหาเกี่ยวกับตัวโครงสร้างจากโครงการเดิม

ปัญหาส่วนใหญ่ของ model คือ

1. การเคลื่อนที่ติดขัดอันเกิดจากความโค้งของตัวรางมากเกินไป เนื่องจากรัศมีความโค้งของตัวรางนั้นแคบมากเมื่อเปรียบเทียบกับตัวรถ ทำให้ในเวลาเข้าโค้งทำให้รถไฟเกิดการติดขัด
2. ชุดล้อที่ใช้ในการลดความผิด บริเวณที่ขนานกับตัวรางมีจำนวนมากเกินไป และยังคงยึดอยู่กับที่ ทำให้เวลาที่รถวิ่งมาในทางโค้งถูกบังคับไว้ด้วยชุดล้อ จนเกิดการติดขัดไม่สามารถวิ่งต่อไปได้
3. รางระบบจ่ายพลังงานให้กับตัวรถมีการรุดเสียหาย และเนื่องจากรางจ่ายพลังงานนี้ทำด้วยวัสดุอลูมิเนียมเส้น และคุณสมบัติของอลูมิเนียมที่มีความลื่นน้อย และความต้านทานไฟฟ้ามาก เมื่อเสียดสีกับแปรงถ่านแล้วทำให้คราบของคาร์บอนติดอยู่ที่ราง เป็นอุปสรรคต่อการนำไฟฟ้า

ดังนั้นจึงได้มีการออกแบบทั้งโครงสร้างของตัวรถและตัวรางขึ้นมาใหม่ โดยคำนึงถึงความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ที่ตัวรถและตัวรางเป็นหลัก อีกทั้งต้องเปลี่ยนอุปกรณ์บางอย่างใหม่เพื่อให้เหมาะสม

#### 3.2 ราง

การทำงานของระบบแม่เหล็กไฟฟ้า อาศัยการควบคุมแรงแม่เหล็ก เพื่อทำให้รถไฟเคลื่อนที่ได้ด้วยแรงผลักและแรงดึงดูดของเส้นแรงแม่เหล็กซึ่งเกิดขึ้นจากส่วน ปฐมภูมิ(primary) เหนี่ยวนำผ่านราง(secondary) ทำให้เส้นแม่เหล็กครบวงจร จึงเกิดแรงลัพท์ขึ้นทำให้รถไฟเคลื่อนที่ ดังนั้น รางจึงเป็นส่วนหนึ่งของวงจรแม่เหล็ก

จากหลักการของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเชิงเส้นพบว่าเกิดทั้งแรงดูดและแรงผลัก เพื่อกำจัดแรงดูดให้น้อยลง เราจึงนำวัสดุที่เป็นตัวนำแต่ไม่มีคุณสมบัติทางแม่เหล็ก ในที่นี้เราเลือกใช้อลูมิเนียม ซึ่งอลูมิเนียมมีคุณสมบัติเบาและมีความแข็งแรงทางกลน้อย ดัดแปลงเป็นโครงสร้างได้ยากและยังมีราคาแพง เราจึงนำเหล็กและอลูมิเนียมมาประกอบเป็นโครงสร้างของรางร่วมกัน ทั้งนี้เพราะเหล็กมีความแข็งแรงดัดแปลงเป็นโครงสร้างได้ง่าย และมีราคาถูก

เนื่องจากเป็นโครงการต่อเนื่อง ในส่วนของการออกแบบรางนั้นไม่มีความจำเป็นต้องออกแบบใหม่ สามารถนำรางเดิมนั้นมาใช้กันได้ การออกแบบรางเดิมนั้นประกอบด้วยแผ่นเหล็กและอลูมิเนียมประกบกัน ในส่วนที่เป็นเหล็ก จะประกอบเป็นรูปตัวที (T) เพื่อใช้เป็นตัวยึดเกาะของรางรถไฟ และยึดติดกับโครงสร้างได้ง่าย

1. ความกว้างของแผ่นตัวนำอลูมิเนียม สามารถหาได้จากสมการ

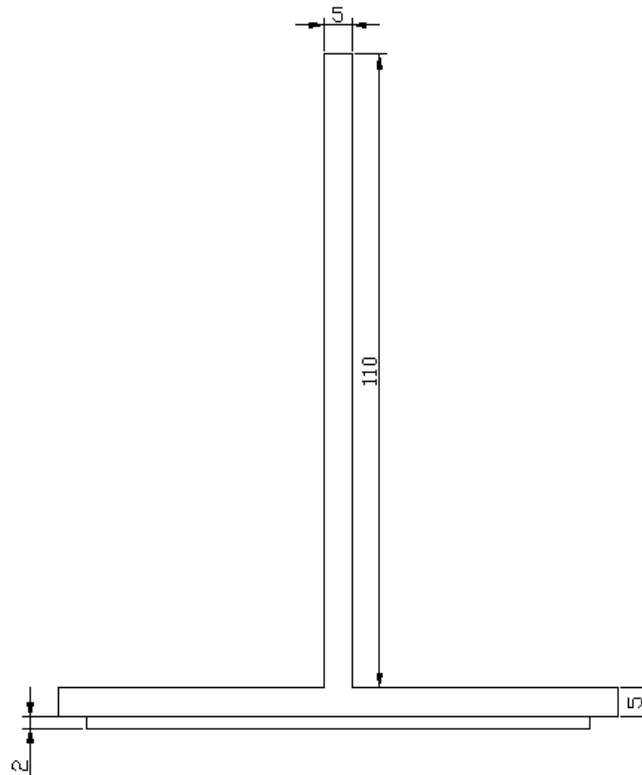
$$\begin{aligned} C &= a + 7 \\ &= 30 + 45/\pi \\ &= 44.32 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$C_s = 2 * C = 88.64 \text{ mm} \sim 90 \text{ mm}$$

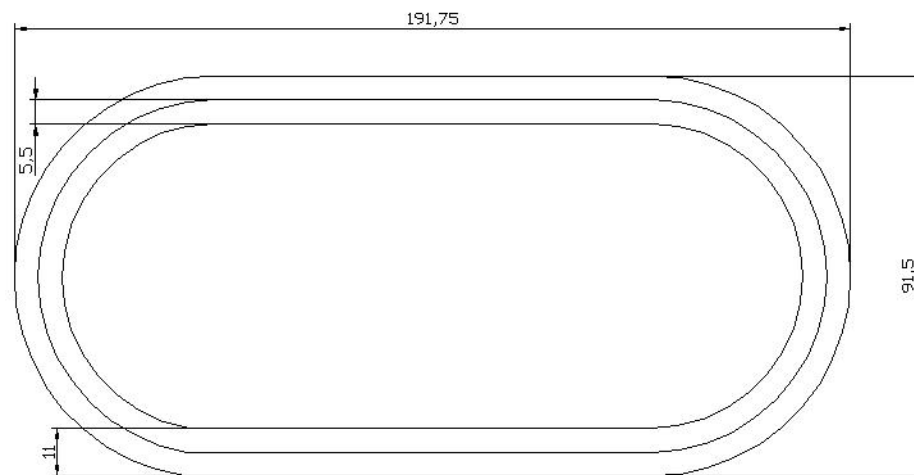
ความกว้างของตารางต้องมากกว่า 90 mm

เลือกใช้แผ่นอลูมิเนียม กว้าง 100 mm

2. ความกว้างของแผ่นตัวนำเหล็ก จะต้องมีความมากกว่า หรือเท่ากับแผ่นตัวนำอลูมิเนียม จึงเลือกความกว้างของตัวนำแกนเหล็ก 110 mm



รูปที่ 3.1 ลักษณะภาพตัดขวางของราง



รูปที่ 3.2 ลักษณะของรางจากภาพ Top view

### 3.3 โครงสร้าง

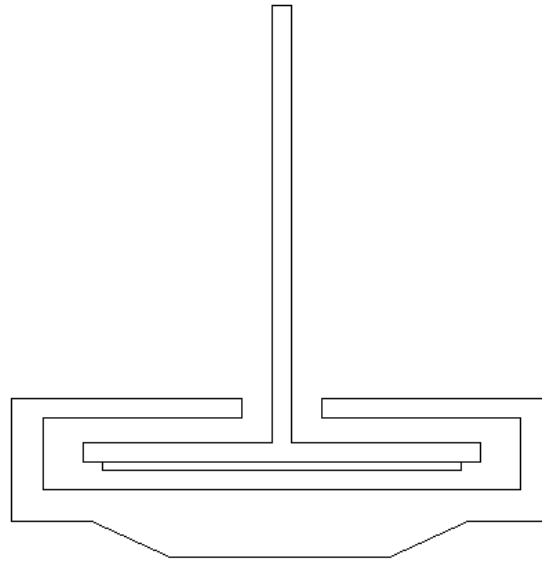
ในโครงการนี้ ต้องการให้รดไฟฟ้าเคลื่อนที่ในลักษณะวนรอบ โดยตัวรดไฟฟ้าจะประกบอยู่ทางด้านล่างของราง จากโครงการรุ่นที่แล้วนั้น ไม่เหมาะสมกับรดไฟฟ้าที่ออกแบบมาใหม่ จึงต้องมีการปรับปรุงในบางส่วน อีกทั้งในโครงสร้างเดิมประกอบด้วยเสารับน้ำหนักเพียง 2 เสาเท่านั้น ทำให้เวลาใช้งานจริงไม่เกิดความสมดุล ดังนั้นเพื่อความสมดุลและรับน้ำหนักได้ดียิ่งขึ้น จึงออกแบบโครงสร้างใหม่ให้มีเสารับน้ำหนักทั้งหมด 4 เสา และเพื่อให้ง่ายต่อการเคลื่อนย้ายเราจึงออกแบบให้โครงสร้างแต่ละส่วนสามารถถอดประกอบได้

### 3.4 การออกแบบโครงสร้างตัวรด

โครงสร้างแบบจำลองเป็นส่วนที่รองรับน้ำหนักทั้งหมดของตัวรด ฉะนั้นส่วนนี้จึงมีความสำคัญมาก ถ้าออกแบบไม่เหมาะสมแล้วแบบจำลองจะไม่สามารถทำงานได้ตามที่ออกแบบ เนื่องจากตัวรดจะเคลื่อนที่ไม่ตรงราง ซึ่งเป็นเหล็กรูปตัวที(T) ดังนั้นโครงสร้างของตัวรดจึงถูกด้วยลักษณะของราง

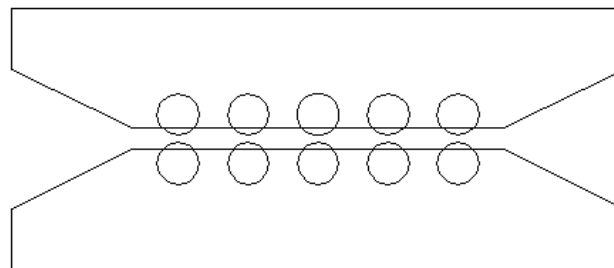
#### 3.4.1 ลักษณะโครงสร้างของรดไฟฟ้าจากโครงการรุ่นที่แล้ว

จากโครงการรุ่นที่แล้วนั้น โครงสร้างของตัวรดไฟฟ้ามีลักษณะแบบโอบรางไว้ทั้งสองข้าง มีล้อประคองทางด้านบน ที่ใช้ลดแรงเสียดทานขณะที่ยังไม่ได้จ่ายไฟ ล้อประคองด้านล่าง ใช้ลดแรงเสียดทานขณะที่จ่ายไฟแล้วและยังใช้ป้องกันดุดตันทันระหว่างรางและรดไฟฟ้าด้วย และล้อทางซ้ายและขวา ใช้ในการประคองด้านข้าง ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แสดงภาพตัดขวางของรางและรถไฟฟ้าโครงสร้างเดิม

ถ้ามองรถไฟจากภาพ Top view จะเห็นว่าชุดล้อที่เรียงกันเป็นจำนวนมาก ที่ใช้ในการบังคับล้อให้วิ่งไปตามตัวรางนั้นมีจำนวนมากเกินไป และล้อที่อยู่ทางหัวท้ายถูกตรึงให้อยู่กับที่ ไม่สามารถยืดหยุ่นหรือเคลื่อนที่ได้ ทำให้ในเวลาเข้าโค้งจึงเกิดการติดขัดได้ ดังรูปที่ 3.4



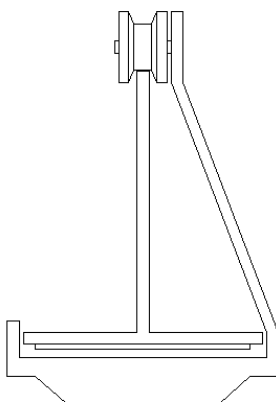
รูปที่ 3.4 แสดงภาพ Top view โครงสร้างตัวรถของรถไฟฟ้ารุ่นก่อน

#### 3.4.2 ลักษณะโครงสร้างของรถไฟที่ทำการปรับปรุงแล้ว

จากหัวข้อที่ผ่านมา เราได้ทราบถึงปัญหาของรถและราง จึงสามารถสรุปแนวทางการแก้ปัญหาในแต่ละประเด็นต่าง ๆ ดังนี้ คือ



1. ในประเด็นแรก หากต้องการแก้ปัญหาที่ราง เนื่องจากความโค้งของรางนั้นมากเกินไป หรือพูดอีกนัยหนึ่งนั่นคือ รัศมีความโค้งแคบเกินไป ดังนั้นถ้าเราขยายความกว้างของรางออกไปอีก จะทำให้รัศมีความโค้งกว้างกว่าเดิม จะทำให้รถไฟวิ่งโค้งได้ง่ายขึ้น
2. แบบที่สองคือ การแก้ไขที่รถไฟไฟฟ้ โดยการทำให้ล้อที่ประคองรางที่ตำแหน่งหัวท้ายมีการยืดหยุ่นได้จาก รูปที่ 3.4 นั่นคือหาวิธีการติดตั้งสปริงที่ด้านข้างของล้อตำแหน่งหัวท้าย เพื่อการยืดหยุ่นให้สัมผัสกับรางทั้งในเวลาเข้าโค้งและในทางตรง จะทำให้รถไฟวิ่งได้ดีขึ้น
3. แบบสุดท้ายคือ การแก้ไขที่รถไฟไฟฟ้เช่นเดียวกัน ด้วยการออกแบบโครงสร้างรถไฟฟ้ขึ้นมาใหม่ โดยที่ให้รถไฟฟ้มีจุดรับน้ำหนักเพียงสองจุดคือ ล้อที่เกาะอยู่กับสันของรางในลักษณะคล้ายกับกระเช้าดัง รูปที่ 3.5 ซึ่งเมื่อเข้าโค้งนั้นจะเป็นไปได้ง่ายกว่าแบบเดิมมาก เนื่องจากไม่มีล้อที่บังคับมากจนเกินไป

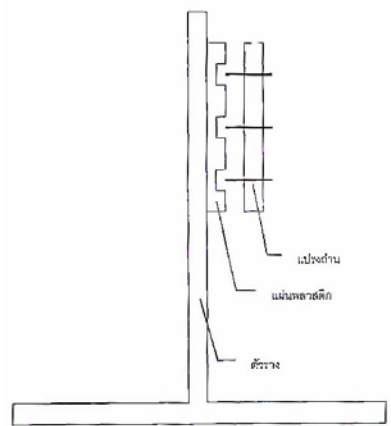


รูปที่ 3.5 แสดงโครงสร้างรถไฟฟ้กับรางในลักษณะ Front view

### 3.5 ระบบป้อนพลังงาน

การให้รถไฟฟ้เคลื่อนที่ไปตามรางได้ จะต้องมีการป้อนพลังงานให้กับตัวรถไฟฟ้ด้วยแรงดันไฟฟ้า 0-220 โวลต์ 3 สาย เนื่องจากตัวรถไฟฟ้มีการเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลา ดังนั้นไม่สามารถป้อนพลังงานไฟฟ้าให้กับตัวรถไฟฟ้ได้โดยตรง

การออกแบบระบบการป้อนพลังงานให้กับตัวรถไฟฟ้ โดยการฝังแผ่นตัวนำทองเหลืองขนาด 4 มม. จำนวน 3 เส้น บนฉนวนเบกาไลท์ที่ติดอยู่เป็นช่วงตามความแข็งแรงของรางทองเหลือง และดึงพลังงานจากตัวนำทองเหลืองผ่านแปรงถ่าน เข้าสู่ตัวรถไฟฟ้ ซึ่งแปรงถ่านมีสปริงเป็นตัวกดให้หน้าสัมผัสของแปรงถ่านสัมผัสกับตัวนำทองเหลืองตลอดการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ แปรงถ่านมีคุณสมบัติลดการเกิดประกายไฟและลดแรงเสียดทานขณะรถไฟฟ้เคลื่อนที่



รูปที่ 3.6 ระบบป้อนพลังงาน

## บทที่ 4

### การออกแบบ Inverter

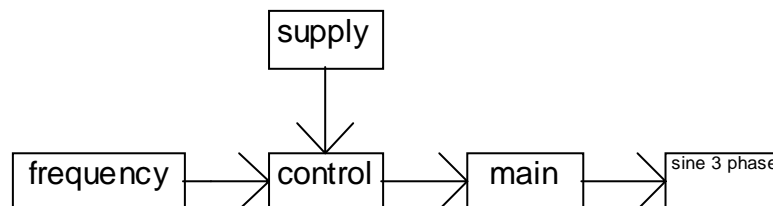
Inverter คือตัวแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ให้เป็นแรงดันกระแสสลับ ซึ่งประกอบด้วย 3 ส่วนหลักคือ

ส่วน supply ส่วน control และส่วน main ดังรูป 4.1

ส่วน supply สร้างเพื่อจ่ายไฟเลี้ยงวงจร control

ส่วน control จะให้สัญญาณ PWM ไปขับ MOSFET ประกอบด้วย วงจรสร้างสัญญาณ sine วงจรขยายสัญญาณ sine วงจร filter วงจร summing วงจรสร้างสัญญาณ สามเหลี่ยม วงจร comparator วงจร dead time และ วงจร driver

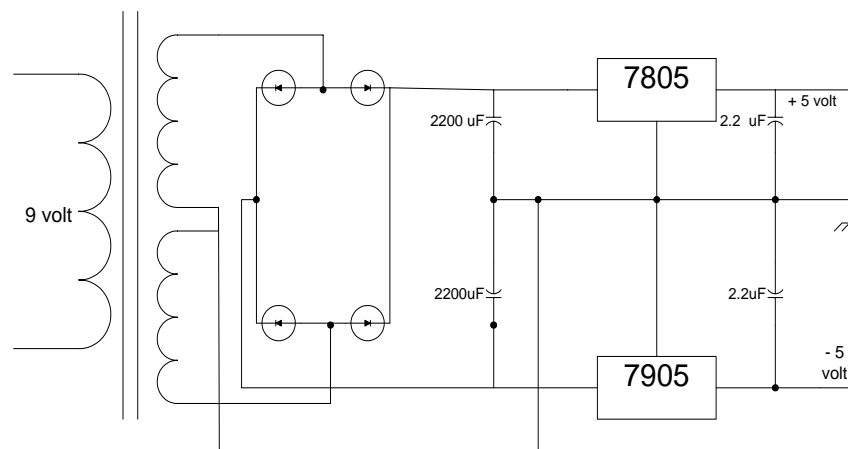
ส่วน main จะให้ แรงดัน AC สามเฟส ประกอบด้วย full bridge rectifier และ ขั้ว MOSFET driver



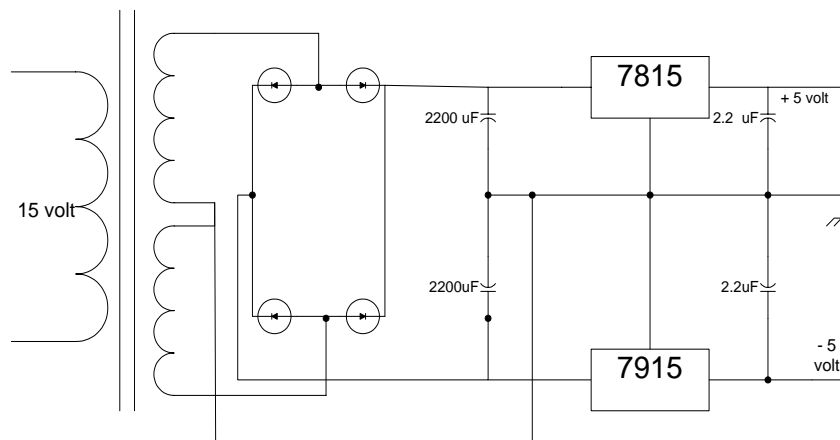
รูปที่ 4.1 แสดง Block Diagram ของ inverter

#### 4.1 วงจร Supply

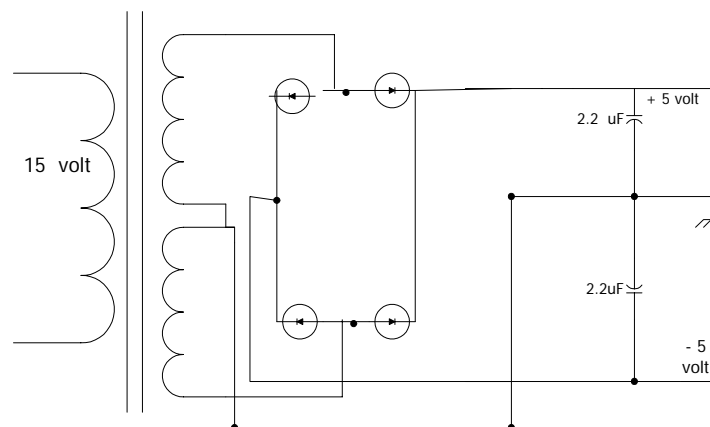
เราจำเป็นต้องมีวงจร supply เพื่อที่จะจ่ายพลังงานให้กับวงจรควบคุม ซึ่งก็จะมีแรงดันที่ Ic ต้องการ คือ  $V_5, V_{15}$



รูปที่ 4.2 แสดงวงจร supply  $\Upsilon$ 5volt



รูปที่ 4.3 แสดงวงจร supply  $\Upsilon$ 15 volt



## รูปที่ 4.4 แสดงวงจร supply $V_{15}$ volt ของวงจร Driver

### 4.1.1 อธิบายวงจร

เราสามารถใช้ หม้อแปลงแรงดัน 9 โวลต์ สำหรับ supply  $V_5$  และใช้หม้อแปลงแรงดัน 15 โวลต์ สำหรับ supply  $V_{15}$  1 ชุด และใช้หม้อแปลงแรงดัน 12 โวลต์ ให้กับ supply  $V_{15}$  สำหรับวงจร driver 4 ชุด แต่ชุด supply นี้จะไม่มี IC regulator เนื่องจากไม่ต้องการความเรียบมากนัก เหตุที่เราต้องแยก supply  $V_{15}$  ที่ใช้กับวงจร ควบคุมและdriver ก็เพื่อป้องกันการผิดพลาด เช่น ลัดวงจรที่เกิดขึ้นที่ Driver กระแสลัดวงจรจะได้อินพุตที่วงจรควบคุม ทำให้วงจรควบคุมปลอดภัย

capacitor 2200  $\mu F$  ใช้เพื่อให้มี การกระเพื่อมของสัญญาณแรงดันน้อยที่สุด แล้วไปที่ ic regulator 7805,7905,7815,7915 ใช้ในการสร้างแรงดัน  $V_5 V$  และ  $V_{15} V$  ตามลำดับ เข้า capacitor 2.2  $\mu F$  เพื่อให้มีการกระเพื่อม และ ลดnoise

## 4.2 วงจร Control

### 4.2.1 การสร้างสัญญาณ Sine Wave

ในการควบคุมการทำงานของ inverter ต้องการสัญญาณ sine เพื่อที่จะไปเป็นตัวเปรียบเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยม ให้ได้สัญญาณ PWM ซึ่งถ้าเราทำ Filter ที่ output ของ MOSFET จะได้แรงดันที่มีขนาดตามขนาดของสัญญาณ sine

ขั้นตอนแรกจะเก็บข้อมูลของค่า sine wave 1 ลูกคลื่นที่ถูก sampling ด้วยความถี่ตาม address ที่ต้องการ คือ 32768 ตำแหน่ง แล้วจะแปลงค่าที่ได้เป็นเลขฐาน 16 เก็บค่าใน EPROM เบอร์ 27C256 - 70 เริ่มต้นในการทำงาน สามารถพิจารณาได้จาก รูปที่ 2.5 เริ่มต้น counter ตัวที่ 1 จะรับสัญญาณ clock วงจรสร้าง clock ซึ่งจะใช้ IC counter 8 bit 2 ตัว ต่อกับ EPROM ซึ่งมี input เพียงแค่ 15 bit ดังนั้นเราจึงไม่ใช้ขาแรกของ counter ต่อกับ EPROM แต่จะเริ่มใช้ขา Q1 จนถึง Q7 ของ counter ต่อกับ ขา address A0-A6 ของ EPROM และ counter ตัวที่ 2 จะรับสัญญาณจาก Q7 ของ counter ตัวที่ 1 มาเป็น clock ซึ่ง output ของ counter ตัวที่ 2 จะต่อกับ A7-A14 ของ EPROM ดังนั้นความถี่ของสัญญาณ clock ที่ใช้จะเป็น 2 เท่า ของความถี่ที่ต้องการ

ซึ่ง counter จะชี้ตำแหน่งข้อมูลที่มีอยู่ใน EPROM ไปเรื่อยๆ ตั้งแต่ตำแหน่ง 0000H ไปจนถึง 7FFFH โดยEPROM เมื่อได้รับสัญญาณอ้างอิง address จาก counter ก็จะส่ง output ออกไปยัง IC latch ซึ่งจะทำหน้าที่ป้องกันความผิดพลาดจากการอ้างอิง address ไม่พร้อมกัน เมื่อข้อมูลออกจาก IC latch จะผ่าน digital to analog converter (DAC) ซึ่งจะได้ output ออกมาเป็นลบ จึงต้องทำการ offset ให้สัญญาณที่ได้เป็น sine wave ที่มีทั้งครึ่งบวกและครึ่งลบ

การคำนวณหาค่าของ sine wave ที่เก็บในแต่ละตำแหน่ง และทำการแปลงเป็นเลขฐาน 16 ทำได้โดยการเขียน program ใน MATLAB ดังต่อไปนี้

```
col = 0; T = 0.02/32768;
```

```

fprintf('\tdb\t');
for t = 0:T:0.02;
    s = 127*(1+sin(2*pi*50*t));
    s1 = round(s);
    col = col+1;
    if col <=7
        fprintf('%03Xh ',s1);
    end
    if col >=8;
        fprintf('%03Xh ',s1);
        fprintf('\n');
        col=0;
        fprintf('\tdb\t');
    end
end
end

```

จากนั้นนำผลที่ได้ไปเก็บใน notepad แล้วแก้ไขโดยเพิ่ม ORG 0000h ที่บรรทัดแรกก่อนข้อมูลที่ได้และ end ที่บรรทัดสุดท้ายของข้อมูล ผลที่ได้จากการ run program ข้างบนและแก้ไขแล้ว ซึ่งแสดงดังตัวอย่างการเก็บค่าเพียง 256 ตำแหน่ง

ซึ่งค่าที่ได้นี้จะนำไป save เป็นนามสกุล .ASM แล้วใช้ sxa51 RUN โปรแกรมจะสร้างไฟล์นามสกุล .HEX ไปทำการ program ลงใน EPROM

ส่วน Program ที่ใช้ในการสร้างสัญญาณ sine wave ที่มี phase shift ไป  $120^\circ$  นั้นสามารถดัดแปลงส่วนโปรแกรมได้ดังนี้

```

col = 0; T = 0.02/32768;
fprintf('\tdb\t');
for t = 0:T:0.02;
    s = 127*(1+sin(2*pi*50*(t+120pi/180)));
    s1 = round(s);
    col = col+1;
    if col <=7
        fprintf('%03Xh ',s1);
    end
end

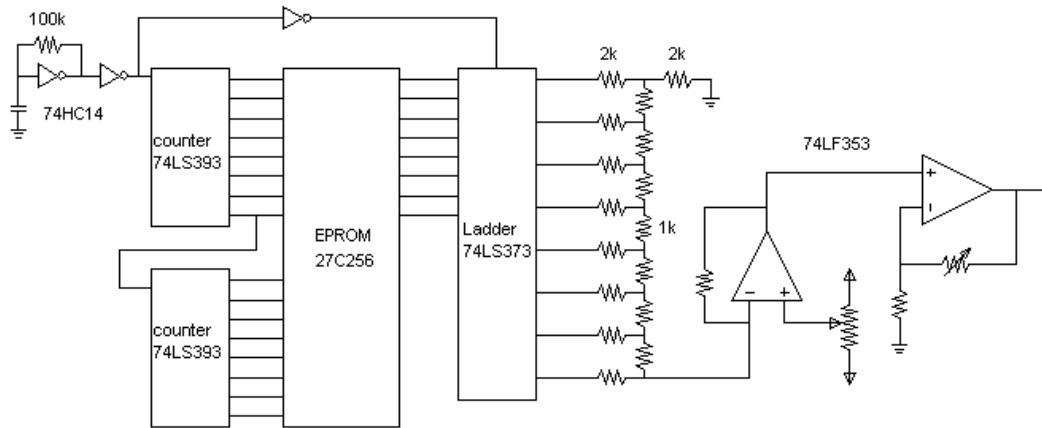
```

```

if col >=8;
    fprintf('%03Xh ',s1);
    fprintf('\n');
    col=0;
    fprintf('\tdb\t');
end
end
end

```

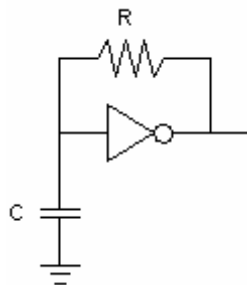
นั่นคือต้องการเปลี่ยนแปลงเฉพาะค่าเริ่มต้น จาก sine wave ที่เริ่มจากมุม 0 องศา ไปเป็น เริ่มต้นจากมุม 120 องศา



#### 4.5 วงจรสร้างสัญญาณ sine

##### 4.2.1.1 การสร้างสัญญาณนาฬิกา (clock)

การสร้างสัญญาณนาฬิกาจะใช้หลักการ การ charge Discharge ของ C กับ การเปลี่ยนแปลงค่าของ logic ของ Schmitt Trigger ที่มีการเปลี่ยนแปลง output ทันทีทันใด เมื่อถึงระดับของการรับรู้ว่าเป็น logic ไต ซึ่งจะใช้ IC เบอร์ 74HC14



## 4.6 วงจร clock

การคำนวณหาค่าความถี่สัญญาณนาฬิกา  
สูตรการคำนวณ

$$\tau = 1.2 / RC$$

เลือก  $C = 150 \text{ pf}$   $R = 1220.7 \ \Omega$

เลือกตัวต้านทานปรับค่าได้  $4.7 \text{ K}\Omega$  ในการสร้างสัญญาณนาฬิกา เพื่อที่จะสามารถปรับความถี่ของสัญญาณ sine wave เพื่อให้ได้ความถี่  $1.25 - 50 \text{ Hz}$  ได้เมื่อเกิดข้อผิดพลาดจาก time delay

## 4.2.1.2 การสร้างวงจร Digital To Analog Converter (DAC)

การสร้างวงจร DAC จะใช้การทำแบบ R-2R ladder network เนื่องจากสัญญาณ Digital ที่ได้ออกมาเป็น 8 bit การคำนวณหา output ที่ออกมาเป็น Analog หาได้จากสูตร

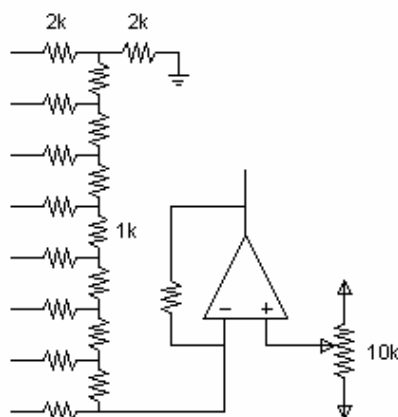
$$V_{\text{OUT}} = -V_{\text{ref}} * B / 2^7 = -V_{\text{ref}} * B / 128$$

เมื่อ  $B$  เป็นเลข Decimal ที่แปลงจากเลขฐานสองแล้ว

ถ้าใช้ค่า Voltage reference เป็น +5 Voltage output สูงสุดมีค่าเท่ากับ

$$V_{\text{OUT}} = -5 (255) / 128 = -9.99609 \text{ V}$$

เนื่องจากค่า Voltage Output ที่ได้มันติดลบ ดังนั้นจึงต้องทำการ Offset Voltage ขึ้น เพื่อให้ได้ค่าที่เป็นสัญญาณ sine wave ที่มีทั้งครึ่งบวกและลบ โดยตัวต้านทานปรับค่าได้ที่ขาบวกของ Op-amp โดยมีแหล่งจ่าย  $\pm 15$  ต่อต้านบนและต้านล่างของตัวต้านทานปรับค่าได้





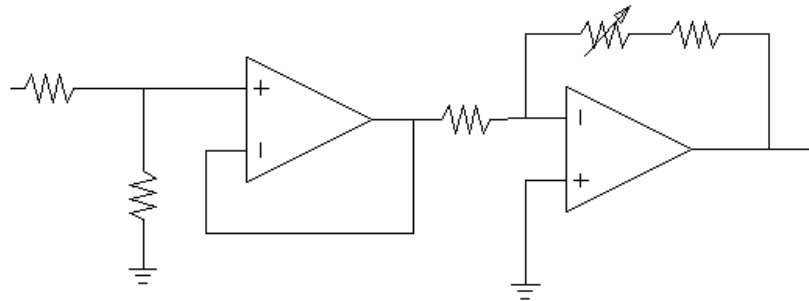
## รูปที่ 4.7 วงจร Digital To Analog แบบมี ออฟเซต

## 4.2.2 วงจร ขยายสัญญาณ sine

เราทำวงจรนี้ก็เพื่อ ทำให้ได้อัตราส่วนแรงดันออกกับความถี่ (v/Hz) คงที่ เมื่อ volt per herze คงที่ก็จะทำให้แกนเหล็กไม่อิ่มตัว เราจะเริ่มจาก แผงวงจร sine สัญญาณ sine มาแล้วเข้าวงจร voltage divider เพื่อลดแรงดัน ให้น้อยสุดเพื่อให้ voltage ในการเริ่มต้น ที่ 1.25 Hz น้อยๆ และหลังจากนั้นก็เพิ่ม voltage ที่แปรผันตาม ความถี่

หลังจากผ่าน วงจร voltage divider แล้วก็เข้าวงจร buffer ก็เพื่อแยกวงจร voltage divider และวงจรขยาย แรงดันออกจากกัน ไม่เช่นนั้นจะทำให้ gain ลดลงเนื่องจากค่าความต้านทานที่เพิ่มขึ้นที่  $R_i$  จากนั้นก็ผ่านเข้าวงจรขยาย gain เพื่อเพิ่มแรงดันได้ และลดแรงดันได้ โดยการปรับ pot 100K  $\Omega$  โดยจะปรับร่วมกับ pot 100K  $\Omega$  อีกตัวที่ทำหน้าที่ปรับ ความถี่ โดย pot ทั้ง 2 ตัวจะมีแกนเชื่อมถึงกันทำให้ปรับ แรงดันไปพร้อมกับความถี่ได้

pot 100K  $\Omega$  ที่ทำหน้าที่ปรับความถี่ เราได้ทำการ lock ความถี่ไว้ที่ 1.25 - 53 Hz โดยนำค่าความต้านทาน 2.5 K  $\Omega$  มาต่ออนุกรมกับ pot 100K  $\Omega$  ที่ทำหน้าที่ปรับความถี่



รูปที่ 4.8 แสดงวงจร ขยายแรงดัน sine

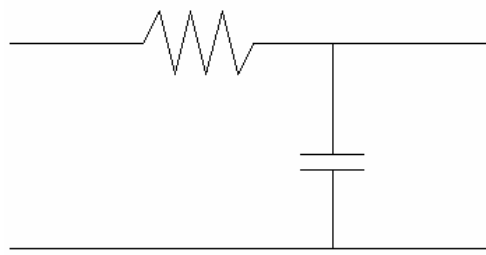
## 4.2.3 การกรองความถี่ต่ำ (Low-pass filter)

สัญญาณที่สร้างขึ้นจากวงจรสร้างสัญญาณ sine wave นั้นจะมีสัญญาณที่มีค่าเป็นจุดไม่ต่อเนื่อง และเมื่อนำไปผ่านวงจรขยายสัญญาณแล้วยังทำให้สัญญาณที่ได้นั้นไม่เรียบมากขึ้น จึงต้องมีการใช้วงจรกรองความถี่ต่ำ (Low-pass filter) โดยคำนวณจาก

$$f_{LPF} = 1/RC$$

$$f_{osc} = 10f_{osc}$$

และตามทฤษฎีต้องการของวงจรกรองความถี่ที่ 50 Hz



รูปที่ 4.9 แสดงวงจร Filter

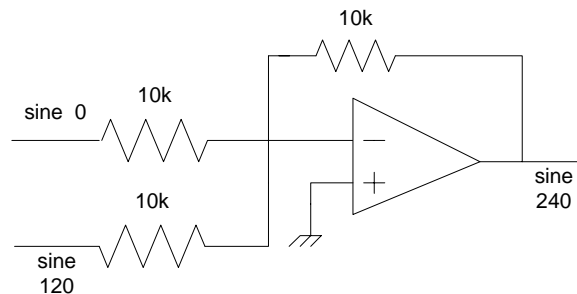
#### 4.2.3 วงจร Summing

วงจร summing สร้างเพื่อ สร้าง sine 240 องศา โดยการรับสัญญาณ sine มาจาก วงจรfilter จาก

$$V_0 + V_{120} + V_{240} = 0$$

$$V_{240} = - (V_0 + V_{120})$$

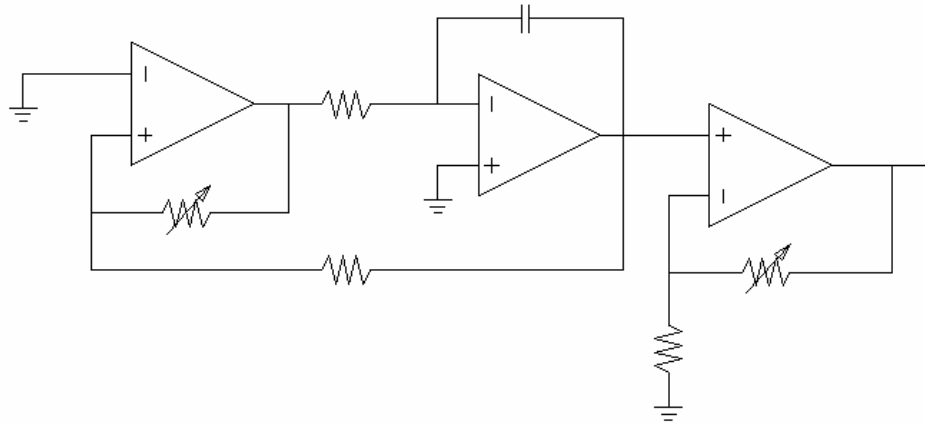
เลือกค่าความต้านทาน  $10K \Omega$  ทั้งหมดเพื่อให้ได้ gain =1 จะได้มี sine 3 ชุดที่ ขนาด เท่ากันและให้ input impedance เข้าใกล้ อนันต์ เมื่อผ่าน วงจร summing แล้วก็จะไปเข้าวงจร เปรียบเทียบ กับสัญญาณ สามเหลี่ยม วงจรแสดงดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 แสดงวงจร summing

#### 4.2.4 วงจรสร้างสัญญาณ สามเหลี่ยม

เหตุที่ต้องสร้างสัญญาณสามเหลี่ยม ก็เพื่อที่จะนำสัญญาณสามเหลี่ยมมา เปรียบเทียบ กับสัญญาณ sine วงจรสามเหลี่ยมในรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 แสดงวงจร Triangular

ที่มาของวงจรสามเหลี่ยม มาจากการ oscillator โดยการป้อนกลับแบบ positive feedback เพื่อให้เกิดเสถียรภาพน้อยลง แต่อัตราขยายเพิ่มขึ้น ซึ่งก็เป็นวงจรประเภทเดียวกับวงจร รีแอสเซชัน ออสซิลเลเตอร์ หรืออีกนัยหนึ่งก็คือ วงจรบูทสแตป ออสซิลเลเตอร์ นั่นเอง

อธิบายวงจรได้ดังนี้ คือ ตอนเริ่มต้นแรงดันที่ขาบวกของออปแอมป์ตัวที่ 1 มีแรงดันมากกว่าขาลบ เพราะฉะนั้น output ของออปแอมป์ตัวที่ 1 ออก 15 โวลต์ ก็ไปเข้าวงจร integrator จึงได้สัญญาณ ramp ที่มี slope เป็นลบ เนื่องจากค่าตัวเก็บประจุที่เก็บประจุได้มากขึ้น

เมื่อเก็บจนเต็มก็ discharge ทำให้แรงดันของออปแอมป์ตัวที่ 2 น้อยลง แต่ตอนนั้น แรงดันที่ขาลบของออปแอมป์ตัวที่ 1 มีแรงดันมากกว่าขาบวก เพราะฉะนั้น แรงดันของออปแอมป์ตัวที่ 1 ออก -15 ก็เป็นเช่นนี้เรื่อยไปดังรูป

ในที่นี้ความถี่ได้

$$f = \frac{R2}{4 * R1 * C1 * R3}$$

เลือกค่า  $R1=R3 = 2.2k \Omega$   $R2$  เป็น ความต้านทานปรับค่าได้ ใช้  $39 k\Omega$  ตัวเก็บประจุ ใช้ 0.1 ไมโครฟารัด เพราะฉะนั้น

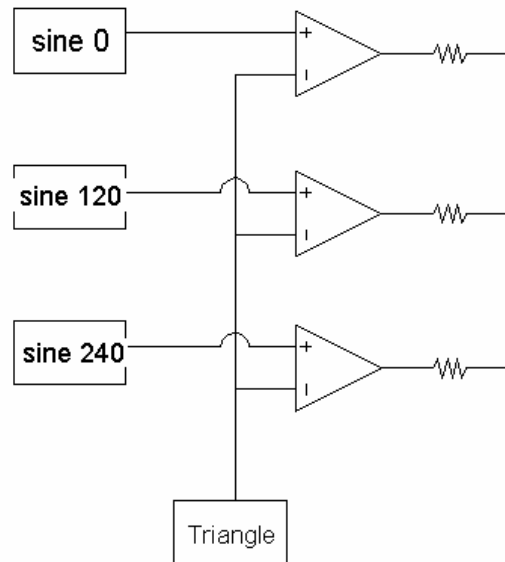
$$f = \frac{39k}{4 * 0.1 * E - 6 * 2.2k} = 20.1kHz$$

voltage ที่ออกมาได้นั้นมีค่าน้อยมากจึงต้องเข้าวงจรขยาย gain โดยเราจะขยายสัญญาณแบบ noninverting โดยเลือกค่าความต้านทานทั้ง  $Ri$  และ  $Rf = 10k \text{ ohm}$  เราจะได้  $gain = 11$

และที่ต้องการความถี่สูงถึง 20.1kHz ก็เพื่อให้มี Harmonic น้อยที่สุด เมื่อได้รูปสัญญาณ สามเหลี่ยมแล้วก็ไปเข้าวงจร compare พร้อมกับวงจร sine

#### 4.2.5 วงจร Comparator

จากที่ได้สัญญาณ sine และสัญญาณสามเหลี่ยม ก็จะเข้าวงจร compare เพื่อได้ PWM ทั้งสาม phase วงจรดังรูป



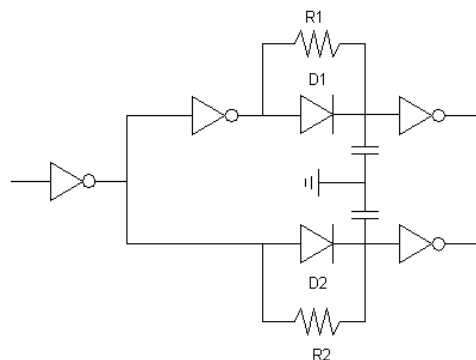
รูปที่ 4.12 แสดงวงจร compare

ซึ่ง output ก็คือ PWM หรือ Pulse Width Modulation ที่ค่าขอดอยู่ที่  $\pm 15$  V เมื่อได้สัญญาณ PWM แล้วก็จะนำไปเข้าวงจร Dead Time ต่อไป

#### 4.2.6 Dead Time Circuit

เนื่องจากการ ON-OFF ของ Mosfet ไม่ได้เกิดขึ้นทันทีทันใด การนำสัญญาณ PWM ที่ได้มาขับโดยตรง จะทำให้เกิดการ ON ที่ Overlap กัน

ดังนั้นจึงต้องสร้างสัญญาณที่เกิดการ Shift phase และสร้าง dead time ระหว่างสัญญาณด้วยเพื่อที่จะทำให้ Mosfet On-Off ไม่พร้อมกัน



รูปที่ 4.13 แสดงวงจร Dead Time

การทำงานของ dead time circuit จากรูปวงจรจะเห็นว่าจาก input เข้ามาวงจรจะแบ่งเป็นสองส่วนคือ ด้านบนและด้านล่าง สามารถอธิบายได้ดังนี้คือ ขณะที่ input ของวงจรชุดบนมี logic เป็น "0" Voltage ที่ตกคร่อม VC1 จะมี logic เป็น "1" output จะมีค่า logic เป็น "0" และเมื่อ input ของวงจรชุดบนเป็น "1" VC1 จะค่อย ๆ ลดลงตามการ discharge ของตัวเก็บประจุ จนกระทั่งถึงระดับ Voltage ที่รับรู้ว่าเป็น logic "0" output จึงจะมีค่า logic "1"

และขณะที่ input ของวงจรชุดล่างมี logic เป็น "0" voltage ที่ตกคร่อม VC2 จะมี logic เป็น "0" output จะมีค่าเป็น logic "1" เมื่อ input ของวงจรชุดล่างมี logic เป็น "1" VC2 จะมี logic เป็น "0" output จะมีค่าเป็น logic "0" และเมื่อ input ของวงจรชุดล่างมี logic "0" VC2 จะค่อย ๆ ลดลงตามการ discharge ของ C จนกระทั่งถึงระดับ Voltage ที่รับรู้ว่าเป็น logic "0" จึงจะได้ output ที่มีค่า logic "1"

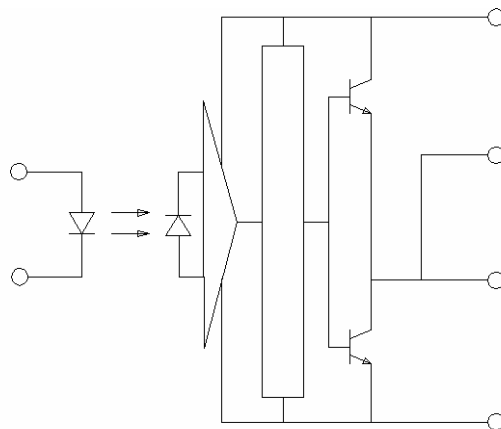
ดังนั้น output ชุดบน จะมีค่าเป็น "1" ไม่พร้อมกันกับ output ชุดล่าง

#### 4.2.7 Mosfet Driver

Mosfet Driver เป็นส่วนที่ขยายสัญญาณเพื่อที่จะไปควบคุมการ ON-OFF ของ Mosfet ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ Opto Isolator กับส่วนที่เป็น current boost

Opto Isolator มีหน้าที่แยกไฟแรงสูงกับแรงต่ำ โดยใช้แสงเป็นตัวกลางในการเชื่อมระบบโดยใช้แสงที่ได้ไปขับในส่วนของ current boost เพื่อขยายกระแสให้มากขึ้น

ในส่วนของ Driver นั้นจะใช้ IC TLP250 เป็น Mosfet Driver ซึ่งสามารถพิจารณา การทำงานของ TLP250 ได้จากวงจรดังรูป

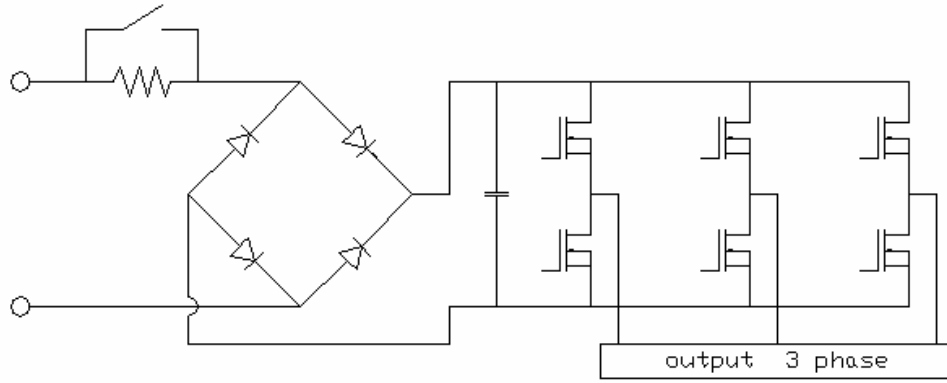


รูปที่ 4.14 แสดงวงจร Driver Mosfet

และขณะที่นำไปต่อใช้งานต้องมีการต่อตัวต้านทาน R เพื่อจำกัดกระแสขาเข้า Opto Isolator ด้วย และต้องต่อตัวเก็บประจุ C ที่ระหว่างขา Supply ทั้งสองข้างเพื่อลดสัญญาณรบกวน

### 4.3 วงจร Main

การแปลงไฟกระแสสลับ 1 เฟส ให้เป็นกระแสตรงในภาคนี้เราจะใช้ diode และ inductor โดยการ  
ใช้วงจร Full Bridge ดังรูป



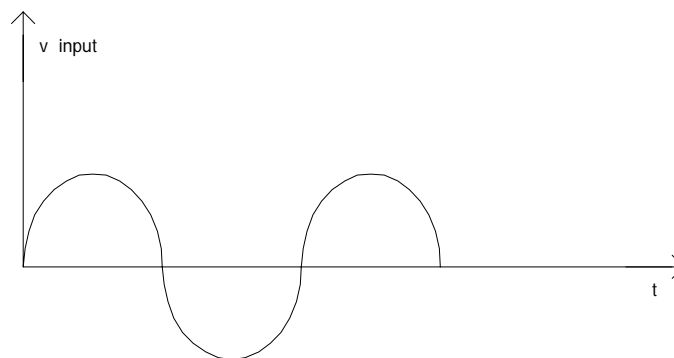
รูปที่ 4.15 แสดงวงจร Full Bridge

C ทำหน้าที่เป็นตัวช่วย ในการทำให้แรงดันของ output ลดลงอย่างช้าๆเมื่อเทียบกับเวลา

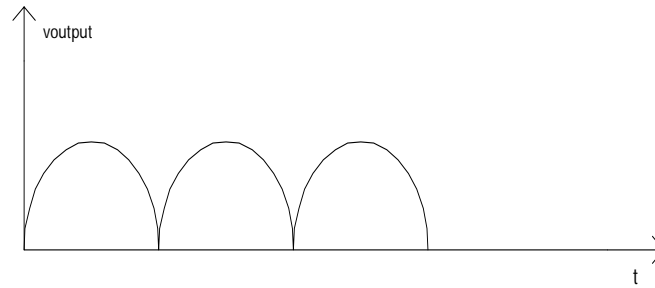
Diode ทำหน้าที่เป็นตัว ลำเรียงกระแสให้เป็นรูป Full wave

อธิบายการทำงานของวงจร(โดยคิดว่าเป็น ideal) เมื่อแรงดัน input เป็นช่วงบวก กระแสจะผ่านไดโอด 1 และ 4 ทำให้  $V_{out}$  เป็นเหมือนแรงดันซีกบวกของแรงดัน input ในช่วง 0 องศา ถึง 90 องศา จะ charge ตัวเก็บประจุ ในช่วง 90 องศา เป็นต้นไป แรงดัน output ก็จะลดลงตามสมการ exponential

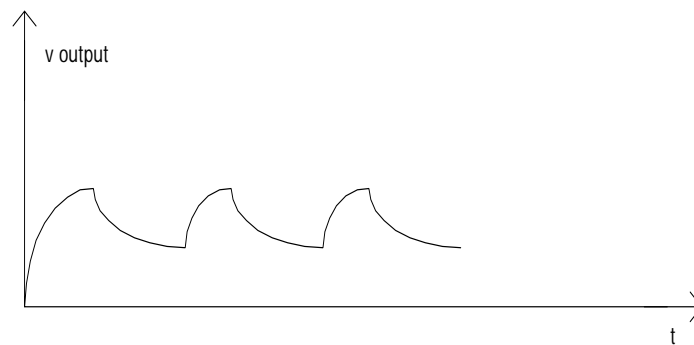
พอถึงจุดที่แรงดัน input เป็นซีกลบ กระแสก็จะผ่าน ไดโอด 2 และ 3 แต่ต้องเป็นไปตามเงื่อนไข คือ เมื่อแรงดันซีกลบ เริ่มที่จะมากกว่า แรงดัน output ก็จะ on ไดโอด 2 และ 3 เพราะฉะนั้นแรงดัน output ก็จะเป็นไปตามแรงดันซีกลบที่ผ่านไดโอด ดังรูป



รูปที่ 4.16 แรงดัน input

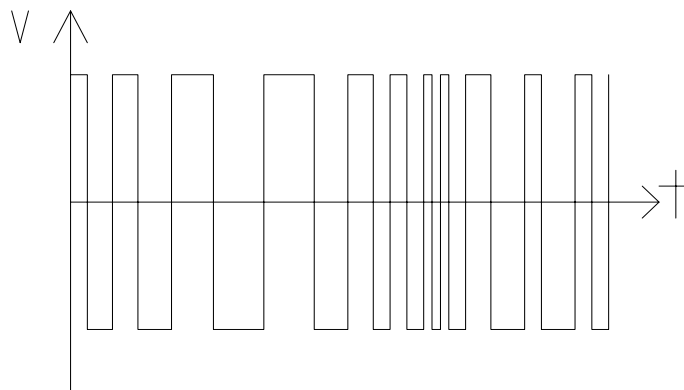


รูปที่ 4.17 แรงดัน output ไม่มี ตัวเก็บประจุ



รูปที่ 4.18 แรงดัน output มี ตัวเก็บประจุ

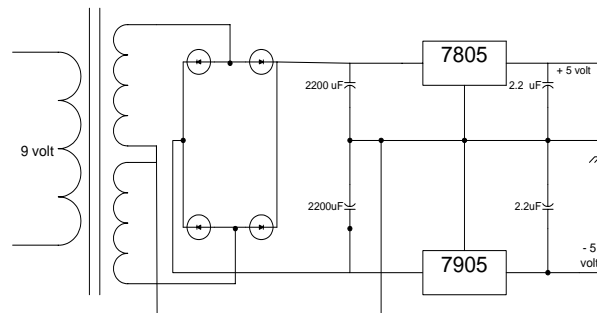
จากรูปก็จะเห็นได้ว่า แรงดัน output จะกระเพื่อม หรือเรียกว่า ripple จากแรงดัน DC ก็จะเป็นแรงดัน input ต่อไปที่จะไปรอที่ ขา Drain เพื่อที่จะออกไปที่ load แต่ก็ต้องรอ สัญญาณจาก Ic Drive ที่ขา gate ซึ่งก็คือ สัญญาณ pwm ดังรูป



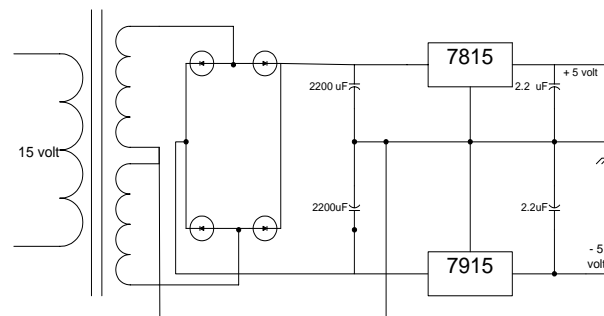
รูปที่ 4.19 แสดงสัญญาณ pwm ที่ได้จากสัญญาณ sine กับ triangular

## บทที่ 5 ผลการทดลอง

### 5.1 การทดลองวงจร Supply



รูปที่ 5.1 วงจร supply  $\pm 5$



รูปที่ 5.2 วงจร supply  $\pm 15$

ผลการทดลองวงจร Supply  $\pm 15$  V ได้ Output เป็น + 14.9 V  
และ - 15.1 V

ผลการทดลองวงจร Supply  $\pm 5$  V ได้ Output เป็น +5.01 V  
และ -5.02 V

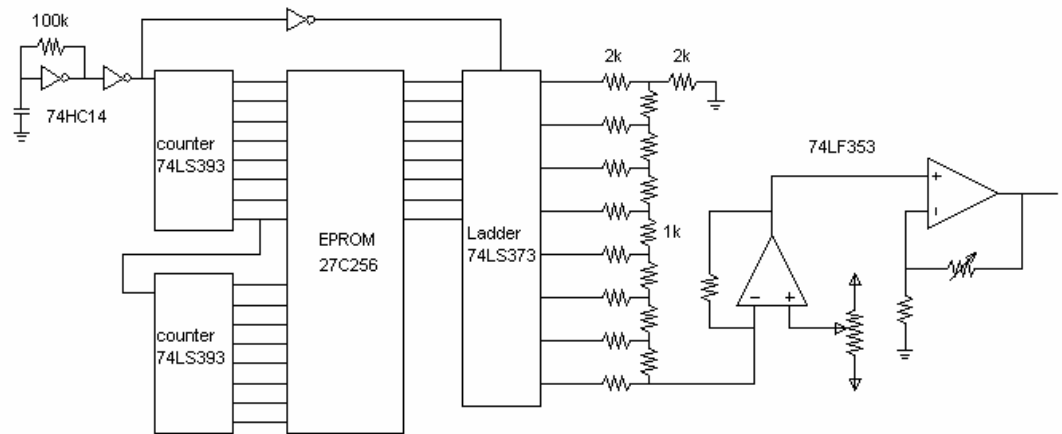
### 5.2 การทดลองวงจร Sine wave

จากการทดลองวงจร sine wave โดยการป้อน supply แรงดัน 5V ให้กับ



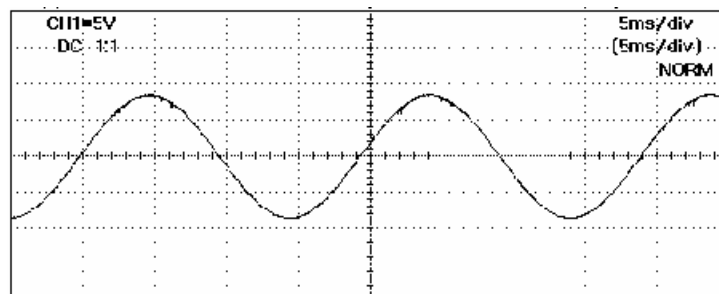
- Schmitt Trigger เพื่อสร้างสัญญาณนาฬิกา
- Counter IC เบอร์ 74LS393 เพื่อหารความถี่
- EPROM IC เบอร์ 27C256 เพื่อเก็บค่าข้อมูล sine
- Latch IC เบอร์ 74LS373 เพื่อทำการ latch ค่าเก็บไว้

และป้อน supply แรงดัน  $V_{15V}$  ให้กับ Op-amp IC เบอร์ LF353 เพื่อทำการ offsetค่าและขยายขนาดสัญญาณ



รูปที่ 5.3 แสดงวงจร sine

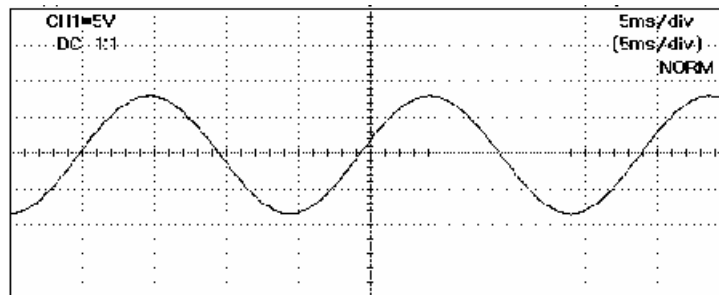
สัญญาณ output วงจร sine wave วงจรที่ 1 ที่ความถี่ 50 Hz



รูปที่ 5.4 แสดงสัญญาณ sine ของวงจรที่ 1

ได้  $V_{p-p} = 17.6V$

สัญญาณ output วงจร sine wave วงจรที่ 2 ที่ความถี่ 50 Hz

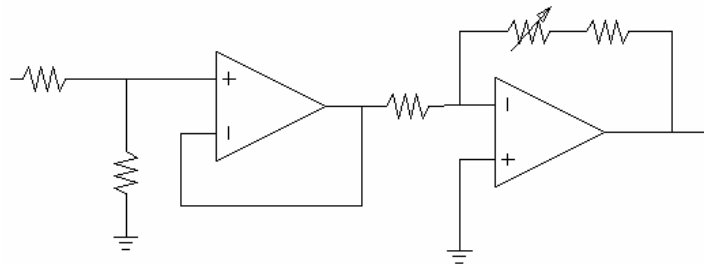


รูปที่ 5.5 แสดงสัญญาณ sine ของวงจรที่ 2

ได้  $V_{p-p} = 16.4V$

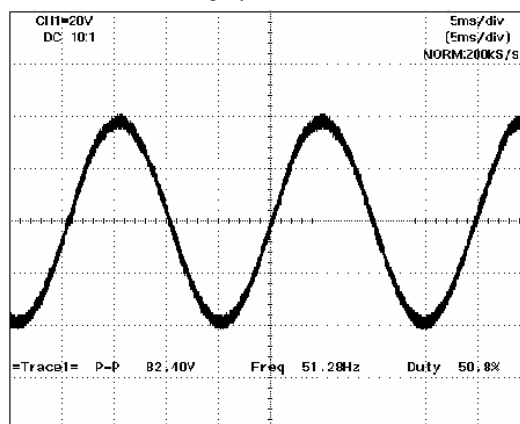
### 5.3 การทดลองวงจรขยายสัญญาณ

จากวงจรขยายสัญญาณเพื่อที่จะให้ Amplitude ของสัญญาณ sine wave เพิ่มขึ้นตามความถี่ที่เพิ่มขึ้น โดยการนำตัวต้านทานปรับค่าได้ R ที่ใช้ในการปรับความถี่ มา Lock กับตัวต้านทานปรับค่าได้ที่ใช้ในวงจรขยาย amplitude



รูปที่ 5.6 วงจรขยายสัญญาณ

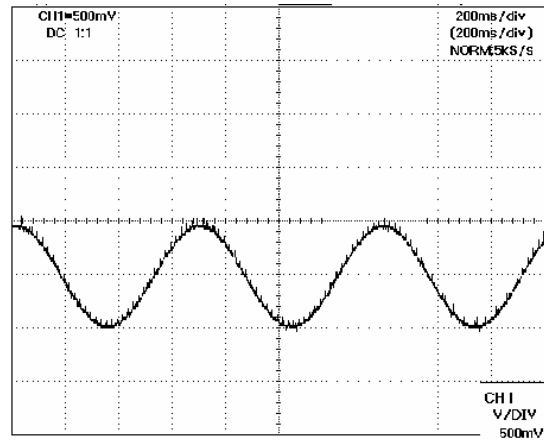
สัญญาณที่ผ่านมาจากวงจรขยายสัญญาณ ที่ความถี่สูงสุด คือ 50 Hz



รูปที่ 5.7 สัญญาณ sine ที่ขยายโดยปรับ gain มากที่สุด

ได้  $V_{p-p} = 8.24V$

สัญญาณที่ผ่านมาจากวงจรขยายสัญญาณ ที่ความต่ำสูงสุด คือ 1.25 Hz

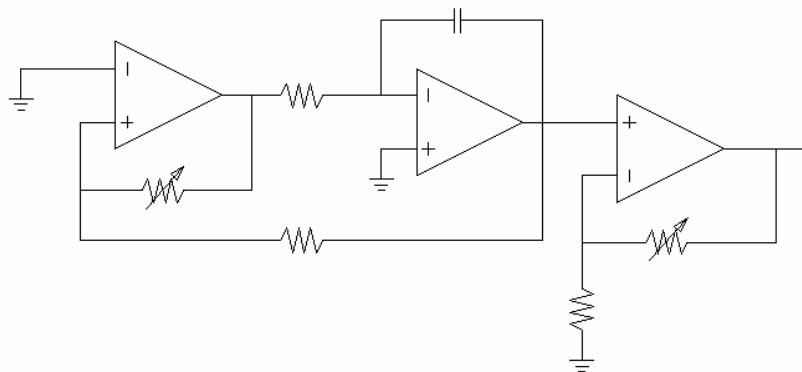


รูปที่ 5.8 สัญญาณ sine ที่ขยายโดยปรับ gain น้อยที่สุด

ได้  $V_{p-p} = 1V$

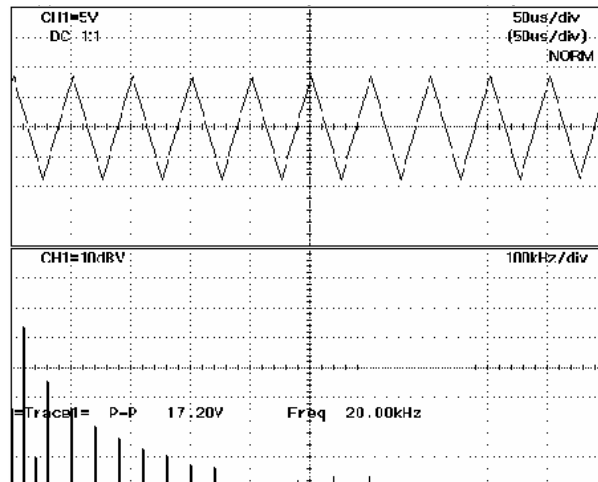
#### 5.4 การทดลองวงจรสามเหลี่ยม (Triangle circuit)

จากการป้อนแรงดัน supply  $\pm 15V$  ให้กับวงจรจะได้สัญญาณสามเหลี่ยม (Triangle wave)



รูปที่ 5.9 แสดงวงจรสร้างสามเหลี่ยม

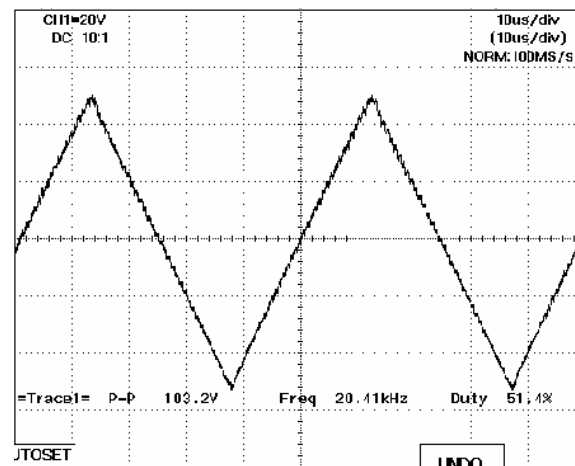
สัญญาณรูปสามเหลี่ยม ที่ความถี่ 20k Hz



รูปที่ 5.10 แสดงสัญญาณสามเหลี่ยมที่ความถี่ 20 kHz

$$V_{p-p} = 17.2V$$

เนื่องจากเมื่อนำไปขับรอกไฟฟ้า แล้วมี Modulation Index น้อยเกินไปจึงต้องมีการปรับค่าแอมพลิจูดของสัญญาณสามเหลี่ยมลงอีกโดยมีความถี่เท่าเดิมคือ 20k Hz ได้สัญญาณดังรูป

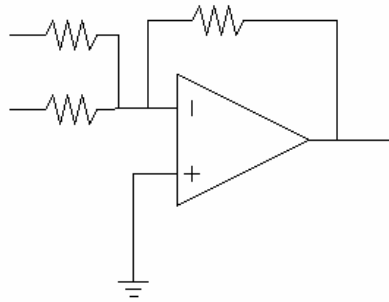


รูปที่ 5.11 แสดงสัญญาณสามเหลี่ยมที่ 20 kHz ที่ทำการปรับค่าแล้ว

$$V_{p-p} = 10.3V$$

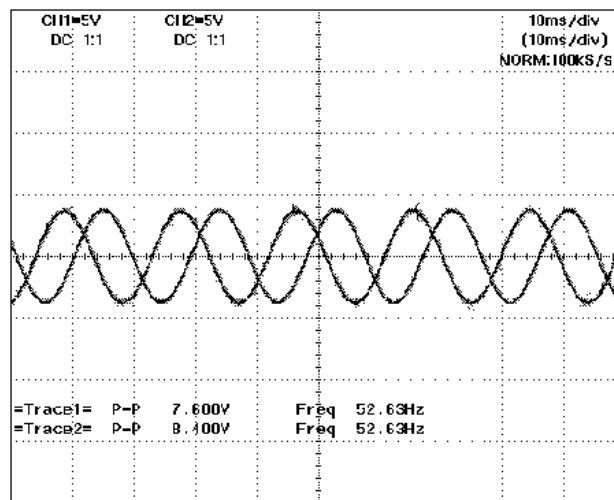
## 5.5 การทดลองวงจร Summing

จากสัญญาณที่สร้างมาจากวงจร sine wave จะได้สัญญาณ sine wave ที่มีมุม 0 องศา และสัญญาณ sine wave ที่มีมุม 120 องศา นำสัญญาณมาผ่านวงจรรอกความถี่ แล้วนำสัญญาณที่ได้มาเข้าที่ input ของวงจร summing



รูปที่ 5.12 วงจร summing

สัญญาณที่ output ของวงจร summing เทียบกับสัญญาณ input ที่เป็นสัญญาณ sine ที่ 240 องศา



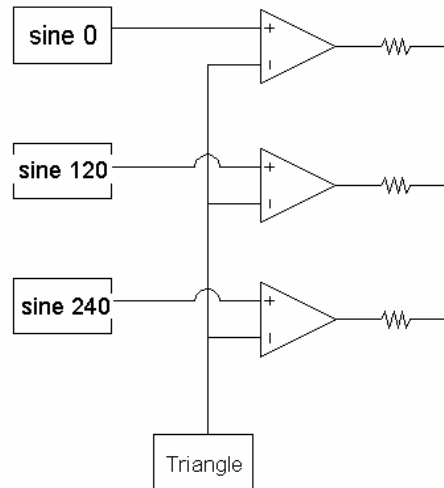
รูปที่ 5.13 สัญญาณเปรียบเทียบระหว่าง sine 0 องศา กับ sine 240 องศา

Vp-p , channel 1 = 7.6 V

Vp-p , channel 2 = 8.1 V

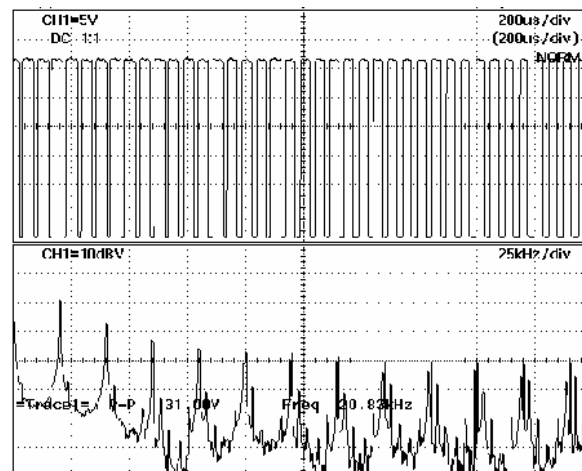
## 5.6 กาทดลองวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ (Comparator)

วงจรนี้จะนำสัญญาณ sine wave และสัญญาณสามเหลี่ยม มาเปรียบเทียบเทียบกัน ถ้าสัญญาณไหนมากกว่ากันก็จะขึ้นเป็น logic "1" หรือเรียกว่าเป็นการ Modulation



รูปที่ 5.14 แสดงวงจร Comparator

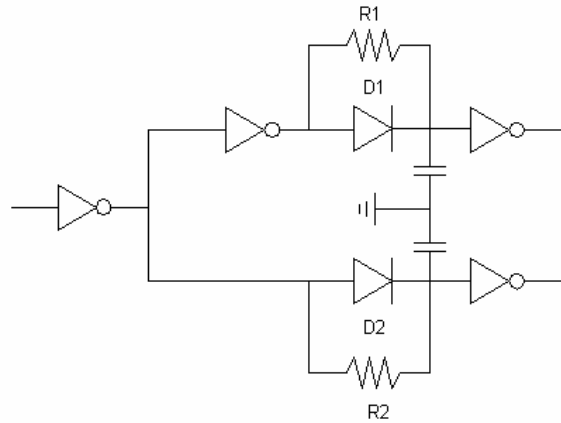
สัญญาณที่เป็น PWM ที่ออกจากวงจรเปรียบเทียบ (compare) ที่ความถี่ 50 Hz



รูปที่ 5.15 สัญญาณ PWM

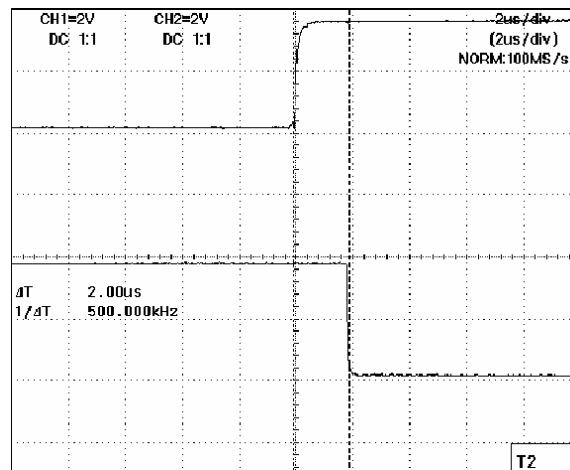
### 5.7 การทดลองวงจร Dead Time

สัญญาณ PWM ที่ได้มาจากวงจร Comparator นั้นจะนำมาเข้าวงจร dead time เพื่อให้ Mosfet ทำงานไม่พร้อมกันพร้อมกัน



รูปที่ 5.16 วงจร Dead Time

สัญญาณ Dead time ที่เปรียบเทียบระหว่างสัญญาณชดบกับชดล่าง ที่ความถี่ 50 Hz



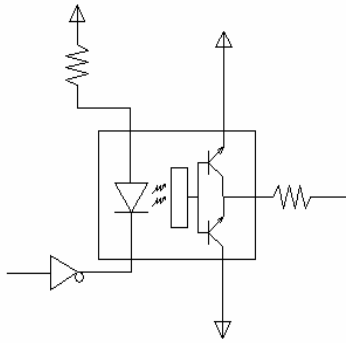
รูปที่ 5.17 แสดงสัญญาณ Dead time เปรียบเทียบกันระหว่าง ชดบกับชดล่าง

ได้ช่วงของ Dead time = 2 μs

หรือที่ความถี่ = 500 kHz

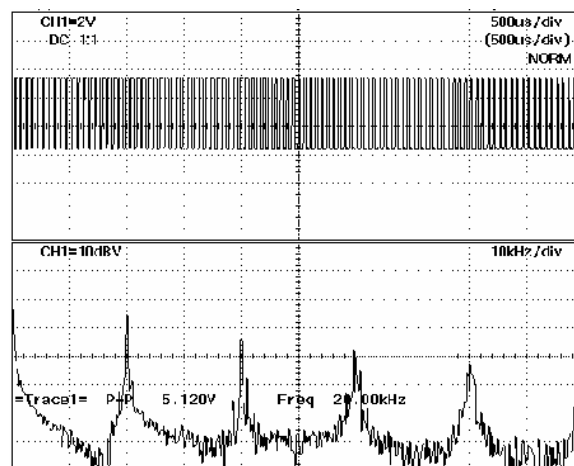
## 5.8 การทดลองวงจร Driver Mosfet

สัญญาณที่ได้มาจากวงจร Dead time จะถูกส่งไปยังชุด Driver Mosfet เพื่อที่จะส่งไปยัง gate ของ Mosfet



รูปที่ 5.18 แสดงวงจร Driver Mosfet

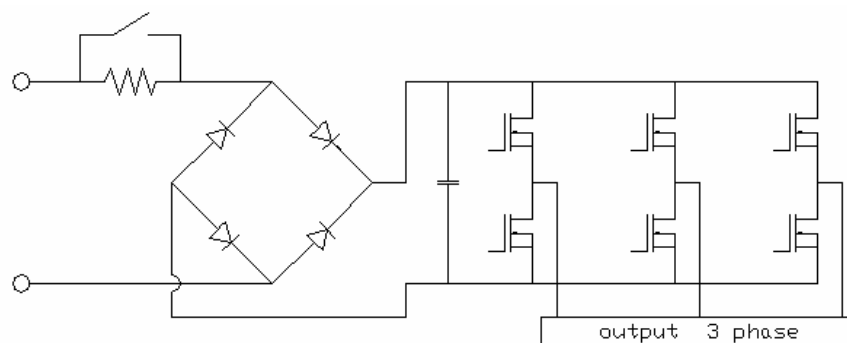
สัญญาณ PWM ที่ออกจากวงจร Driver Mosfet ที่ความถี่สูงสุด คือ 50 Hz



รูปที่ 5.19 สัญญาณ PWM ที่ได้จาก MOSFET

## 5.9 การทดลองวงจร Main

จากชุดวงจร Main ได้ค่าดังนี้

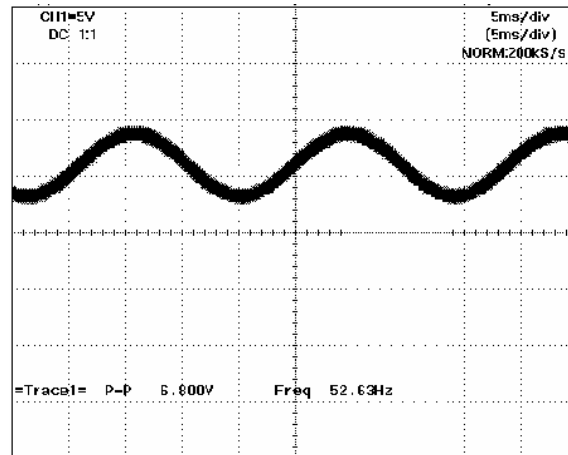


รูปที่ 5.20 วงจร Main



### 5.9.1 ยังไม่มีการต่อโหลด (No-load)

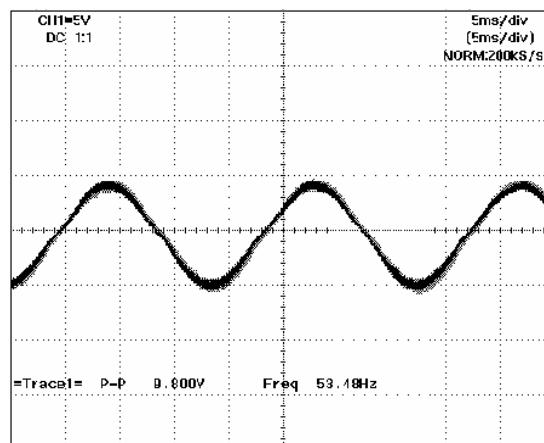
สัญญาณ output ของเฟส A ที่ความถี่ 50 Hz โดยการป้อน input 100 Vdc และผ่านการกรองความถี่ต่ำและไม่ได้ต่อโหลด (No-load)



รูปที่ 5.21 แรงดัน output ของ MOSFET เฟส A

$V_{p-p} = 68 \text{ V}$

Voltage output ระหว่างเฟส A กับเฟส B ที่ความถี่ 50 Hz โดยการป้อน input 100 Vdc และผ่านการกรองความถี่ต่ำ และไม่ได้ต่อโหลด (No-load)

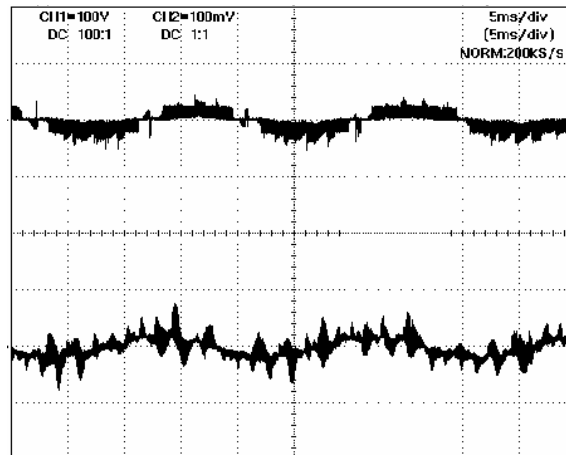


รูปที่ 5.22 แรงดัน output ของ MOSFET ระหว่าง เฟส A และเฟส B

$V_{p-p} = 98 \text{ V}$

### 5.9.2 ต่อ Load เป็นโหลด Resistive และ Inductive

Voltage output ระหว่างเฟส A กับเฟส C ที่ความถี่ 50 Hz โดยการป้อน input 300 Vac และผ่านการกรองความถี่ต่ำ และต่อโหลด R 1 ตัว โหลด L 2 ตัว

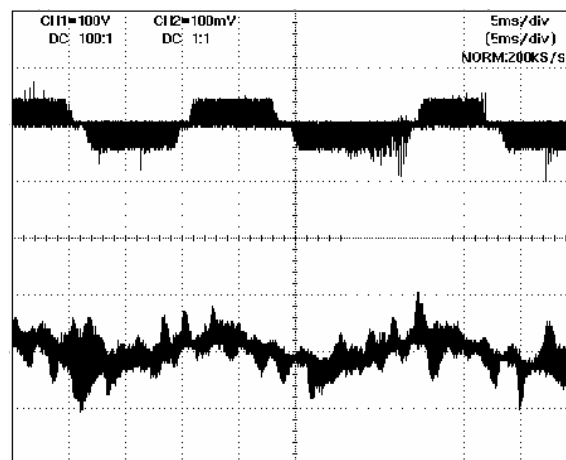


รูปที่ 5.23 แรงดัน output ที่ต่อโหลด R 1 ตัว L 2 ตัว

Ch1 :  $V_{p-p} = 37.5V$

Ch2 :  $I_{A,p-p} = 0.4 A$

Voltage output ระหว่างเฟส A กับเฟส C ที่ความถี่ 50 Hz โดยการป้อน input 300 Vac และผ่านการกรองความถี่ต่ำ และต่อโหลด R 3 ตัว โหลด L 2 ตัว

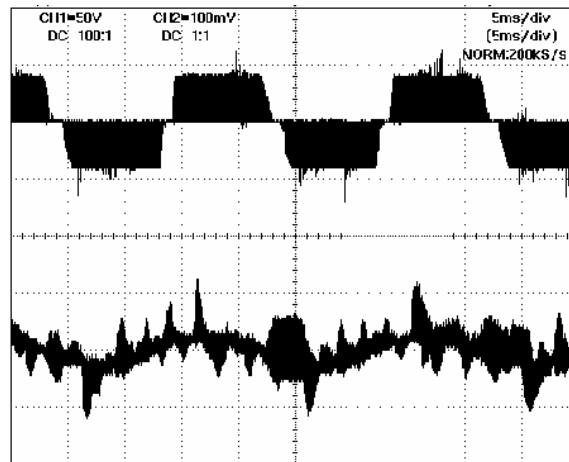


รูปที่ 5.24 แรงดัน output ที่ต่อโหลด R 3 ตัว L 2 ตัว

Ch1 :  $V_{p-p} = 100V$

Ch2 :  $I_{A,p-p} = 0.5A$

Voltage output ระหว่างเฟส A กับเฟส C ที่ความถี่ 50 Hz โดยการป้อน input 300 Vac และผ่านการกรองความถี่ต่ำ และต่อโหลด R 8 ตัว โหลด L 2 ตัว

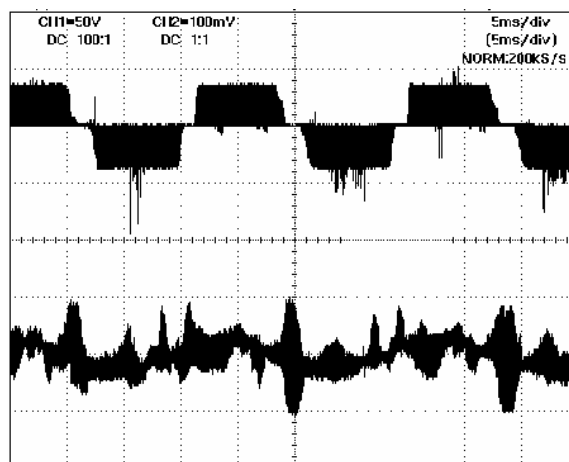


รูปที่ 5.25 แรงดัน output ที่ต่อโหลด R 8 ตัว L 2 ตัว

Ch1 :  $V_{p-p} = 450V$

Ch2 :  $I_{Ap-p} = 0.5A$

Voltage output ระหว่างเฟส A กับเฟส C ที่ความถี่ 50 Hz โดยการป้อน input 300 Vac และผ่านการกรองความถี่ต่ำ และต่อโหลด R 8 ตัว โหลด L 8 ตัว



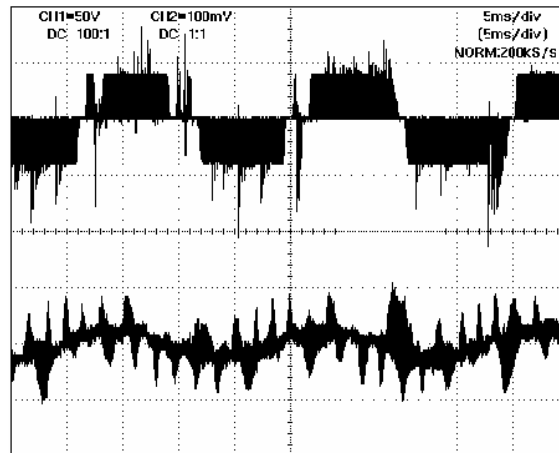
รูปที่ 5.26 แรงดัน output ที่ต่อโหลด R 8 ตัว L 8 ตัว

Ch1 :  $V_{p-p} = 362.5V$

Ch2 :  $I_{Ap-p} = 0.5A$

### 5.9.3 ต่อโหลดเป็นมอเตอร์ 3 เฟส ขนาด 1 แรงม้า

Voltage output ระหว่างเฟส A กับเฟส C ที่ความถี่ 50 Hz โดยการป้อน input 300 Vac และผ่านการกรองความถี่ต่ำ และต่อโหลด Motor 3 phase

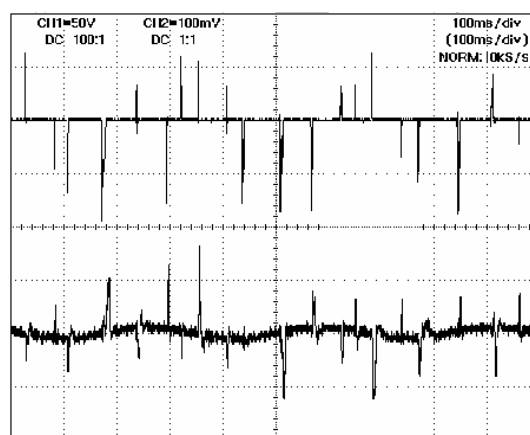


รูปที่ 5.27 แรงดัน output ที่ต่อโหลด เป็น Motor 50 Hz

Ch1 :  $V_{p-p} = 300V$

Ch2 :  $I_{Ap-p} = 0.5A$

Voltage output ระหว่างเฟส A กับเฟส C ที่ความถี่ปานกลาง โดยการป้อน input 300 Vac และผ่านการกรองความถี่ต่ำ และต่อโหลด Motor 3 phase (ขนาด 400V)

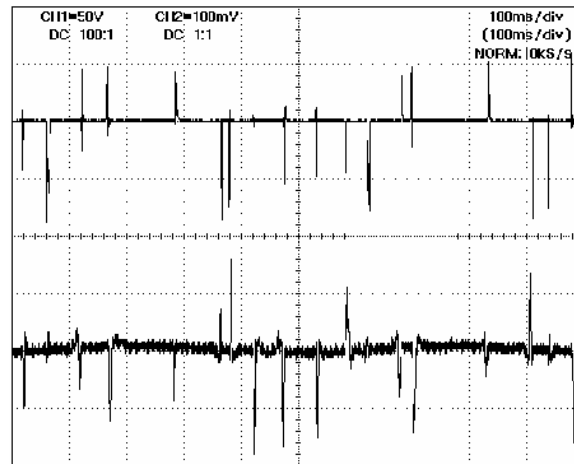


รูปที่ 5.28 แรงดัน output ที่ต่อโหลด เป็น Motor ที่ความถี่ ปานกลาง

Ch1 : Vp-p = 300V

Ch2 : IA,p-p = 0.2A

Voltage output ระหว่างเฟส A กับเฟส C ที่ความถี่ต่ำสุด โดยการป้อน input 300 Vac และผ่านการกรองความถี่ต่ำ และต่อโหลด Motor 3 phase

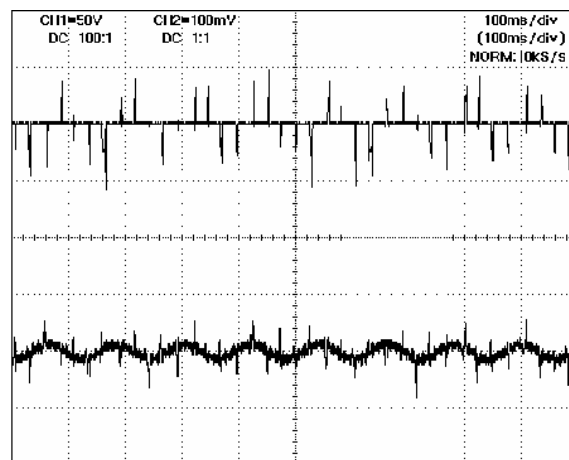


รูปที่ 5.29 แรงดัน output ที่ต่อโหลด เป็น Motor ที่ความถี่ 1.25 Hz

Ch1 : Vp-p = 250V

Ch2 : IA,p-p = 0.2A

Voltage output ระหว่างเฟส A กับเฟส C ที่ความถี่ใดๆ โดยการป้อน input 100 Vac และผ่านการกรองความถี่ต่ำ และต่อโหลด Motor 3 phase



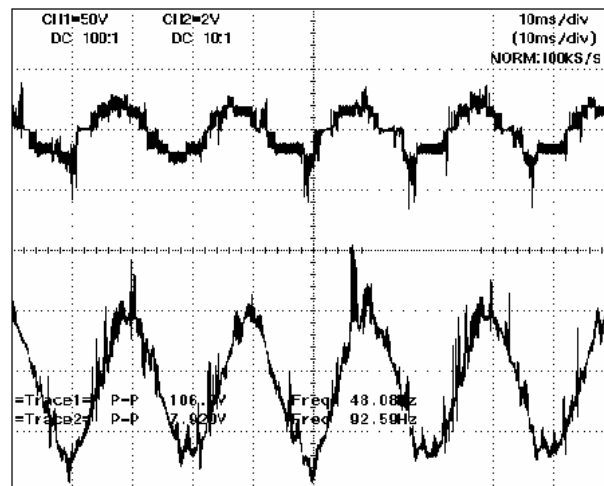
รูปที่ 5.30 แรงดัน output ที่ต่อโหลด เป็น Motor ที่ความถี่ ใดๆ

Ch1 :  $V_{p-p} = 90V$

Ch2 ;  $I_{A,p-p} = 0.3A$

#### 5.9.4 ต่อโหลดเป็นรถไฟฟ้า (Linear Induction Motor Model)

Voltage output ระหว่างเฟส A กับเฟส C ที่ความถี่ใดๆ โดยการป้อน input 150–200 Vac และต่อโหลด Linear Induction motor model ที่มีการ modify Modulation ratio แล้ว



รูปที่ 5.31 แรงดัน output ที่ต่อโหลด เป็น Linear Induction motor model ที่ modulation index = 1

Ch1 :  $V_{p-p} = 250V$

Ch2 :  $I_{A,p-p} = 2A$

## บทที่ 6

### สรุป วิจารณ์ และข้อเสนอแนะ

#### 6.1 ด้านโครงสร้าง

##### 6.1.1 ความก้าวหน้าทางด้านโครงสร้าง

- มีการเปลี่ยนแปลงรางสัมผัสที่ใช้ในการจ่ายพลังงานให้กับรถไฟ จากเส้นอลูมิเนียมมาเป็นเส้นทองเหลืองซึ่งมีความเหนียวมากกว่า และเนื่องจากรางเก่าใช้พลาสติกยึดด้วยกาวกับตัวรางจ่ายพลังงาน จึงทำให้ไม่มีความแข็งแรงเพียงพอ เราจึงเปลี่ยนมาใช้ทองเหลืองเส้นยึดกับเบกาไลท์ ซึ่งเป็นฉนวนอย่างดีด้วยอีพ็อกซี ทำให้แข็งแรงกว่า
- ออกแบบโครงสร้างที่รับน้ำหนัก เนื่องจากโครงสร้างเดิมมีความไม่สมดุลขณะใช้งาน และมีขนาดไม่เหมาะสม จึงทำการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างใหม่ให้มีลักษณะแบบ 4 ขา และมีขนาดที่เหมาะสม
- มีการดัดแปลงล้อที่ใช้ประกอบเพื่อให้รถวิ่งไปกับรางได้ดียิ่งขึ้น โดยการทำให้ล้อประกอบรถไฟมีการเคลื่อนที่ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ทำให้ล้อมีการยึดหยุ่นได้เพื่อการทรงตัวขณะที่เลี้ยวได้ดียิ่งขึ้น
- เนื่องจากแปลงถ่านตัวเดิมชำรุดเสียหายมาก จึงเปลี่ยนและออกแบบโครงสร้างการสัมผัสใหม่ให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น

นอกจากนี้ยังมีการปรับปรุงโครงสร้างภายนอกของรถไฟทำให้ความเหมาะสมไม่ใหญ่จนเกินไป และสายไฟที่ชำรุด

##### 6.1.2 ปัญหาและแนวทางแก้ไข

การพัฒนาแบบจำลองรถไฟ จากโครงสร้างเดิม เพื่อให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น จึงมีการแก้ไขปัญหาดังกล่าวทั้งตัวรถไฟและรางดังนี้

##### 6.1.2.1 การติดขัดในทางโค้ง

เนื่องจากรถไฟเดิมนั้น มีปัญหาด้านการเลี้ยวโค้งที่เกิดมาจากล้อที่ใช้ประกอบรถ ดังนั้นจึงมีแนวทางแก้ไขอยู่ 2 วิธีคือ

1. ทำให้ล้อที่ใช้ประกอบมีการเคลื่อนที่หรือยึดหยุ่นได้
2. ออกแบบโครงสร้างรถไฟใหม่ ให้มีลักษณะเป็นกระเช้าแขวนอยู่กับรางเพียงข้างเดียว แต่เนื่องจากการทดลองจริงพบว่า ในวิธีการที่ 2 เกิดปัญหาขึ้นมาก ไม่สามารถทำให้รถวิ่งได้อย่าง

คล่องตัวดังนี้

- เนื่องจากที่ออกแบบใช้เหล็กฉากเป็นวัสดุ และเมื่อทำการออกแบบแล้วนั้น จะพบว่าต้องขยายความกว้างของรอกออกไปอีก ซึ่งเมื่อเทียบกับขนาดของตัวสเตเตอร์แล้วมีขนาดใหญ่กว่ามาก ดู เทอะทะไม่สวยงาม

- แบบที่ออกแบบนั้นเป็นลักษณะการใช้แกนข้างเดียวอยู่กับราง ดังนั้นจึงทำให้เกิดความไม่สมดุล และการใส่ล้อประกอบสองด้านทำได้ยาก

- เนื่องจากขอบของรางเดิมมีความไม่เรียบไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นขณะทดลองวิ่งจึงทำให้เกิดการส่ายของรถไฟ

ดังนั้นการแก้ปัญหาจึงสามารถทำได้โดยวิธีแรก

#### 6.1.2.2 ความถี่ของรางสัมผัสจ่ายไฟ

เนื่องจากรถไฟเดิมใช้รางจ่ายไฟที่ทำด้วยอลูมิเนียม จากคุณสมบัติของอลูมิเนียมคือนำไฟฟ้า ความถี่ที่ผิวน้อย ดังนั้นทำให้แปลงถ่านลิกไดง่าย

แนวทางการแก้ไขคือ ใช้ทองเหลืองแทน ซึ่งคุณสมบัติของทองเหลืองคือ ความถี่ที่ผิวดีกว่าอลูมิเนียม

#### 6.1.2.3 ความโค้งของรางเดิมไม่สม่ำเสมอ

เนื่องจากความโค้งของสันรางไม่สม่ำเสมอทำให้ขณะแล่นโค้งเกิดการติดขัด

แนวทางการแก้ไขคือ ต้องทำการตัดโค้งใหม่ให้มีความเรียบมากขึ้น หลังจากการตัดโค้งแล้วทดลองวิ่ง ผลปรากฏว่า รถไฟวิ่งได้ดีขึ้นการติดขัดน้อยลงมาก

และปัญหาอย่างอื่นส่วนใหญ่นั้น เกิดจากการหาซื้ออุปกรณ์ต่างๆที่สามารถนำมาดัดแปลงใช้กับตัวรถไฟ เนื่องจากอุปกรณ์บางอย่างนั้นไม่สามารถหาซื้อได้ทั้งไป เช่นทองแดงเส้น(ใช้ทองเหลืองเส้นแทน) หรืออุปกรณ์บางอย่างหาซื้อยาก เช่น เบกาไลท์

## 6.2 ด้าน Inverter

### 6.2.1 ความก้าวหน้าทางด้าน Inverter

Inverter เป็นตัวแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ โดยในโครงการนี้จะแปลงแรงดันไฟฟ้าออกมาเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส ซึ่งมี Modulation index = 1 ที่สามารถนำไปขับ Load ให้แบบจำลอง Linear Induction Motor ที่ได้ทำการปรับปรุงแล้วในภาคการศึกษาแรก

### 6.2.2 ปัญหาและแนวทางแก้ไข

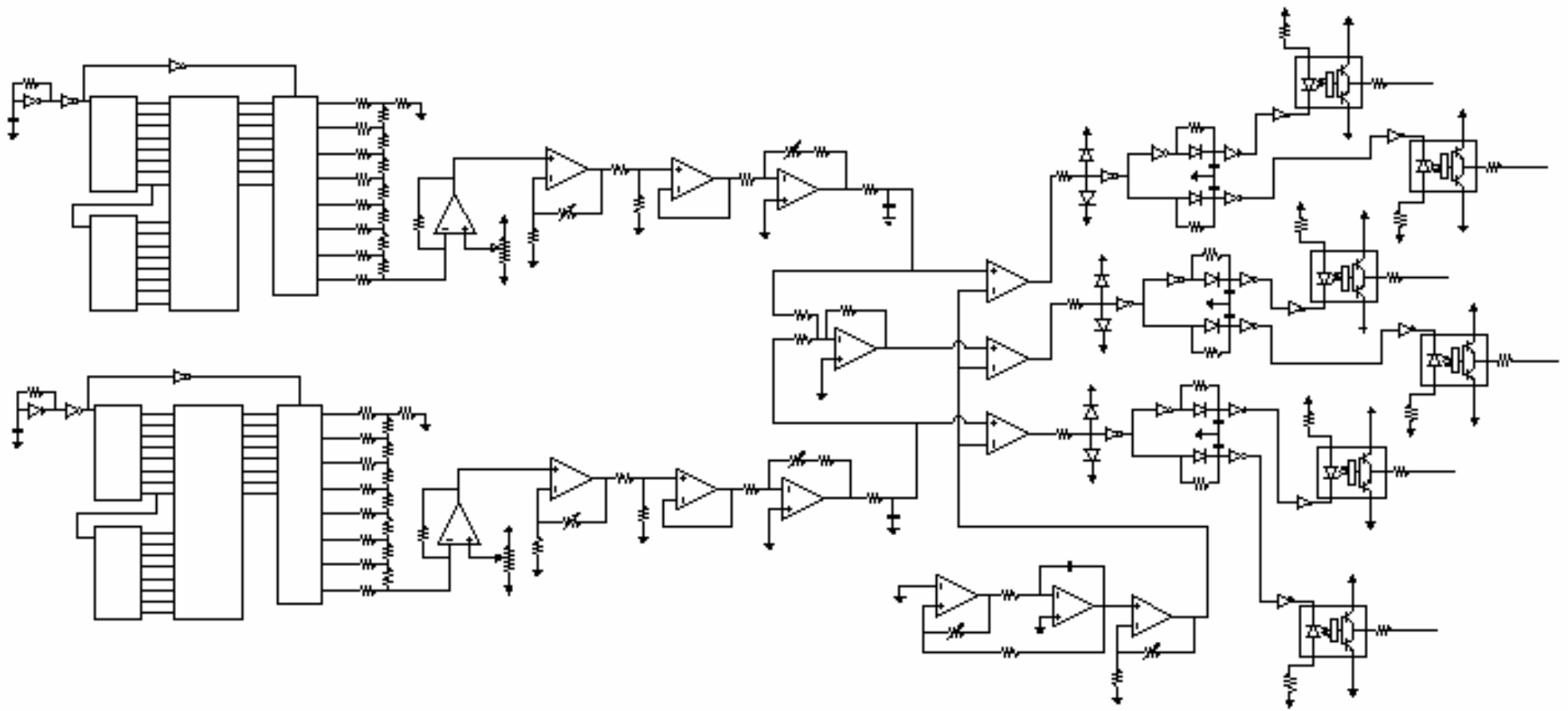
6.2.2.1 การขับเคลื่อนรถไฟที่ติดนั้น ควรเริ่มด้วยความถี่ต่ำ และเร่งจนไปถึงที่ความถี่ 50 Hz แต่ที่ความถี่ต่ำกว่า 50 Hz ลงมาเพียงเล็กน้อยเท่านั้น กระแสไฟฟ้าสูงถึง 4 แอมป์ ซึ่งขดลวดที่ Stator ทนได้ 5 แอมป์ ถ้าเราลดความถี่ลงไปอีกกระแสไฟฟ้าจะทำให้ฉนวนไหม้ได้ และในที่สุดก็จะเกิดการลัดวงจรในที่สุด

แนวทางแก้ไขทำได้โดยการเปลี่ยนอัตราส่วน แรงดันต่อความถี่ให้เหมาะสม เพื่อไม่ให้กระแสเกิน 5 แอมป์ ซึ่งจะทำให้ขดลวดเสียหายได้ แต่วิธีนี้เป็นแบบ Open Loop Control ซึ่งไม่เป็นระบบ Automatic แต่เรามีอีกวิธีหนึ่งคือ Feed Back Control แบบ PI Controller ที่เป็นระบบ Automatic เพราะระบบนี้จะจำกัดกระแสตามที่เรากำหนดไว้



6.2.2.2 ลำดับการเปิด Switch ถ้าเปิดผิดอาจทำให้เกิดการลัดวงจรได้ คือการที่เราเปิด Main Switch ก่อน Control Switch ซึ่งวงจร Dead Time ยังไม่สามารถสร้างสัญญาณ PWM ที่ช่วงของการ ปิด เปิด ที่ไม่พร้อมกันของ Mosfet ได้ จึงเกิดการลัดวงจร

แนวทางแก้ไขทำได้โดยการใช้ Timer ในการทำลำดับการ เปิด ปิด Switch หลัก อาจจะใช้ Magnetic Contactor



แสดงวงจร Control circuit ทั้งหมด

# Linear Induction Motor Model

---

EE2002-6

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. สัมฤทธิ์ หังสะสุตร

น.ส. เบญญา ลัญจนวัฒน์ รหัส 421765-0

นาย พรชัย อังกุลนาค รหัส 421801-6

# วัตถุประสงค์

---

- เพื่อศึกษาและปรับปรุงการทำงานของ **Linear induction motor model**
  - เพื่อปรับปรุงระบบส่งกำลังไฟฟ้าของ **model**
  - เพื่อปรับปรุงรางและ โครงสร้างของ **model**
  - ศึกษาและออกแบบ **Inverter 3 เฟส** ปรับ  
ความถี่ได้
-

# ขอบข่ายของการทำงาน

---

- ปรับปรุงโครงสร้างของ **Induction motor** และออกแบบ **model**
  - ปรับปรุง ชุดปฐมภูมิ (ตัวรถ) และ ชุดทุติยภูมิ(ราง)
  - สร้าง **Inverter** เพื่อใช้ในการควบคุมความเร็ว โดยการปรับความถี่
-

# Inverter

---

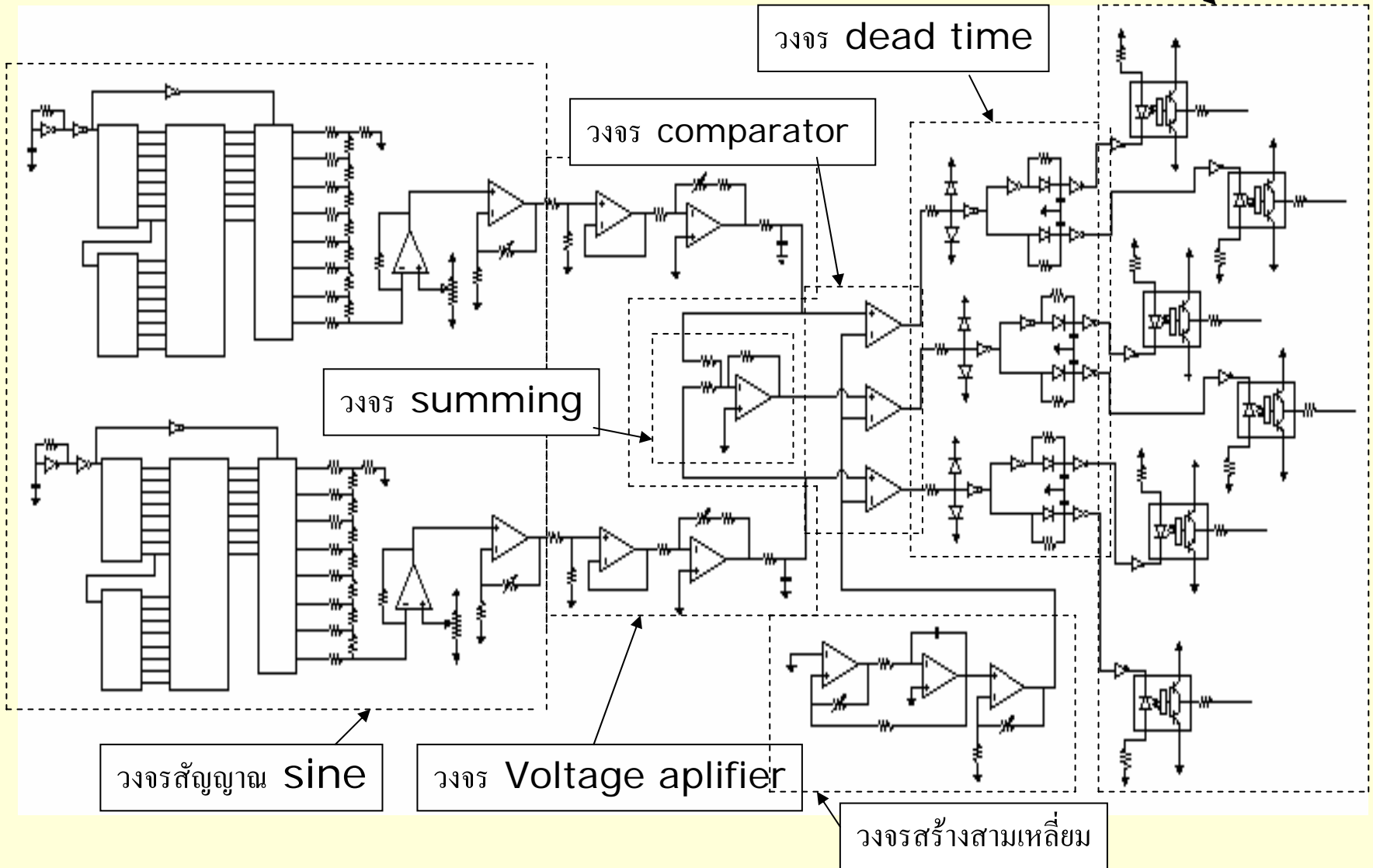
เนื่องจากตัว Linear Induction Motor Model นั้นต้อง  
กระแสไฟที่เป็น Three phase ดังนั้น เราจึงสร้าง Inverter  
เพื่อที่จะแปลงกระแสไฟจาก Single phase ไปเป็นกระแสไฟ  
Three phase จึงจะทำให้สามารถนำ Model ไปทำการติดตั้งได้  
สะดวก

โครงการนี้ใช้การทำ Inverter แบบแปลงกระแส single  
phase ไปเป็นกระแส Three phase โดยการใช้ส่วน control  
circuit ไปควบคุมการสวิตซ์ของ Mosfet



# วงจรรวมของ Control Circuit

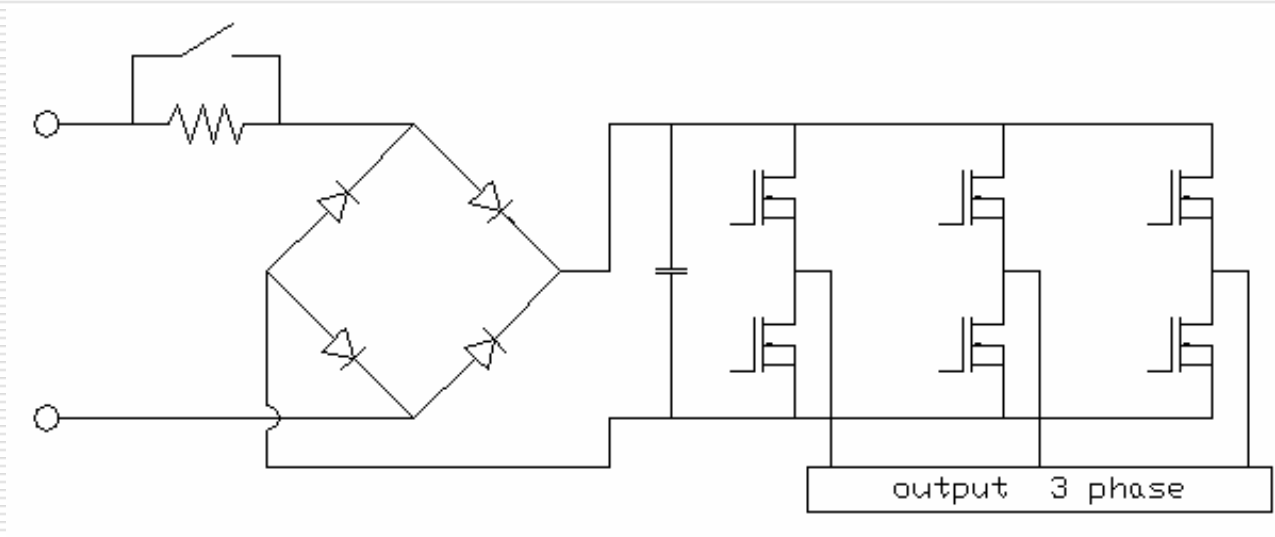
Driver Mosfet



# วงจรหลัก(Main circuit)

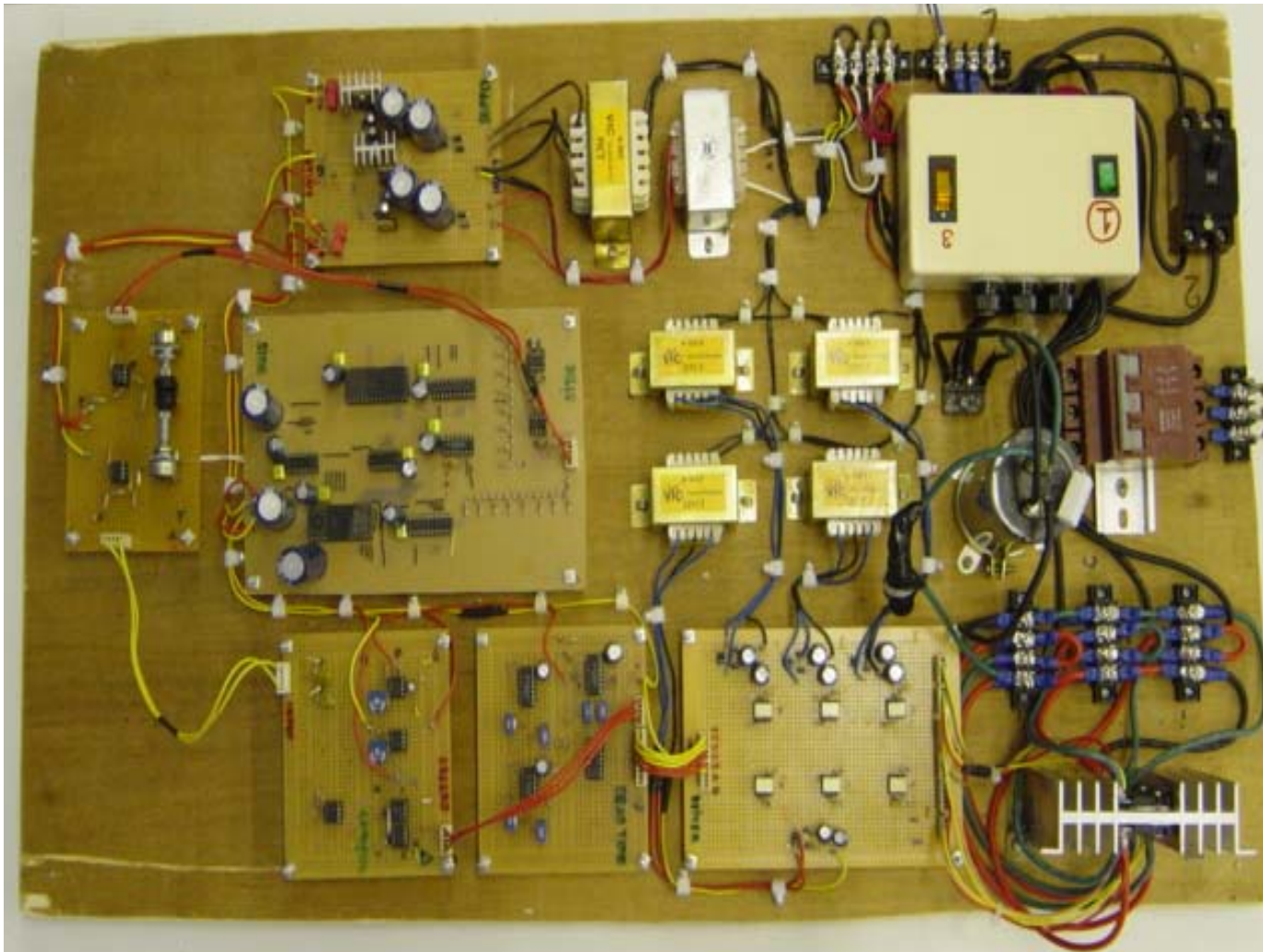
---

การทำงานของวงจร main จะอาศัยการ switching ของ Mosfet โดยใช้ PWM ที่ส่งมาจาก driver Mosfet ในการควบคุม



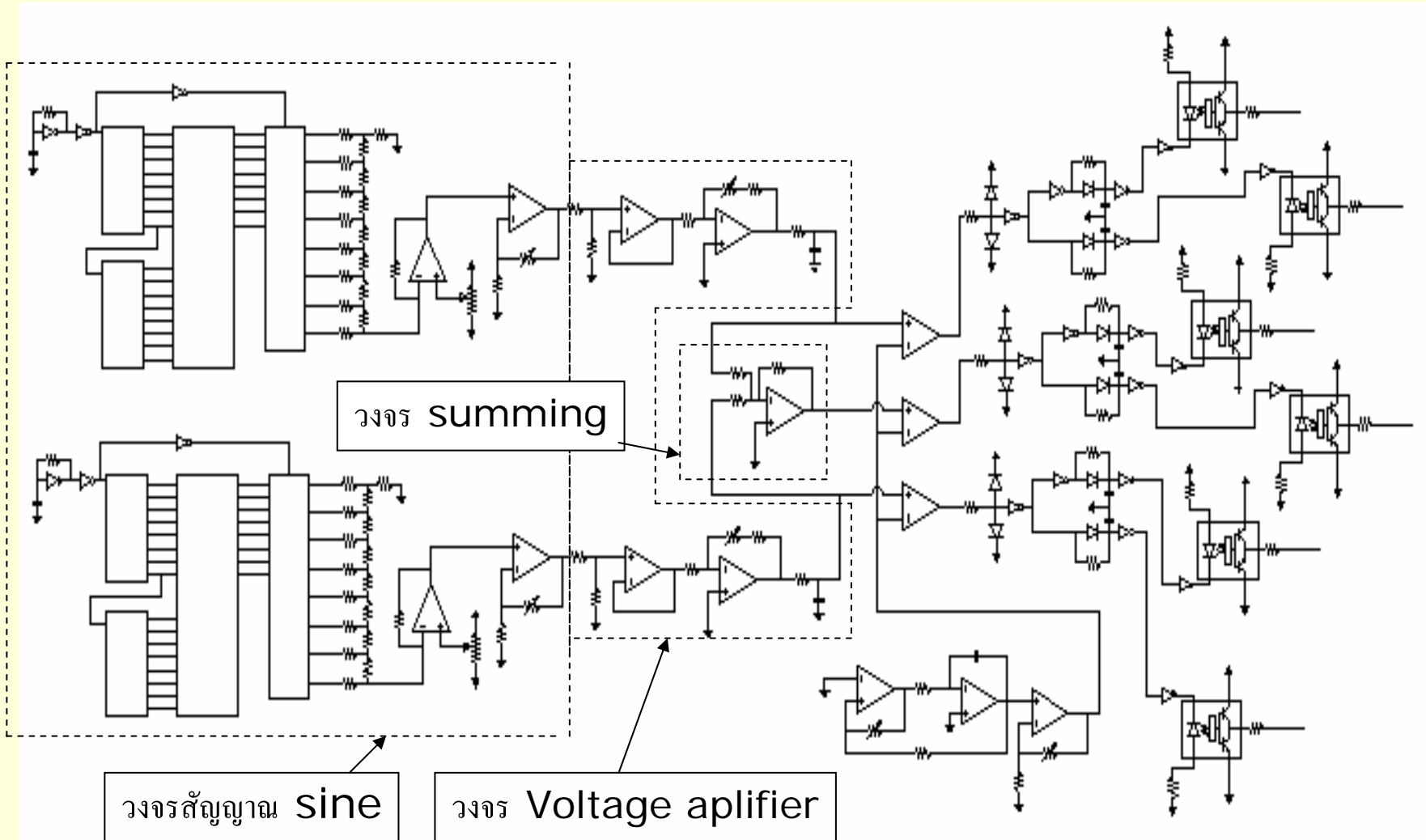


# Inverter

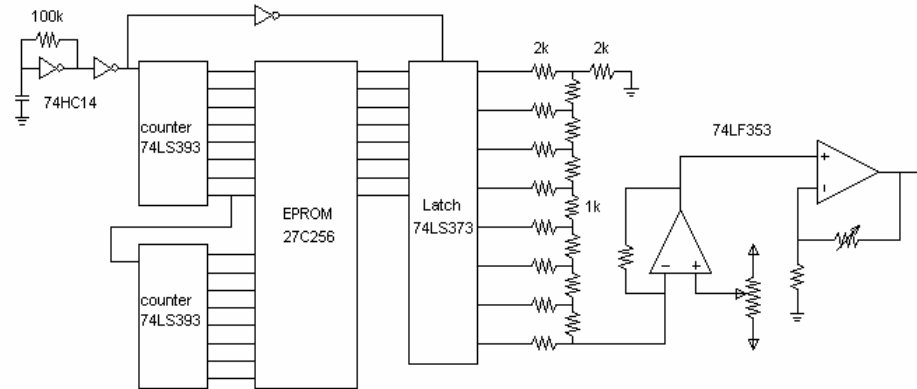




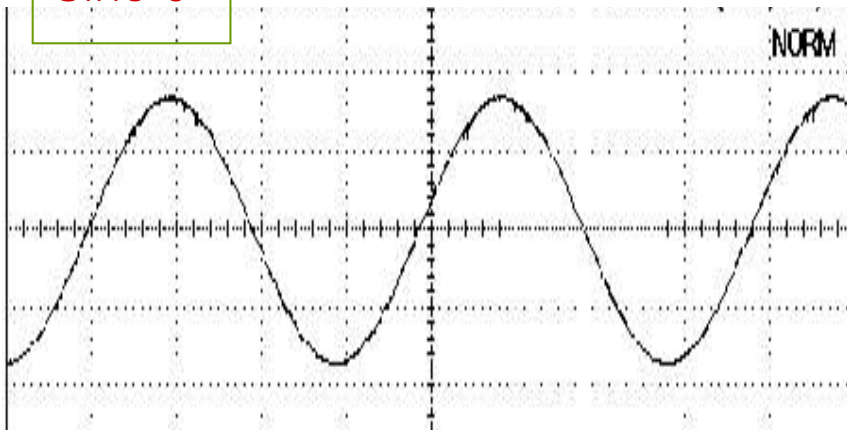
# การสร้างสัญญาณ sine 3 phase



# การสร้างสัญญาณ sine 3 phase

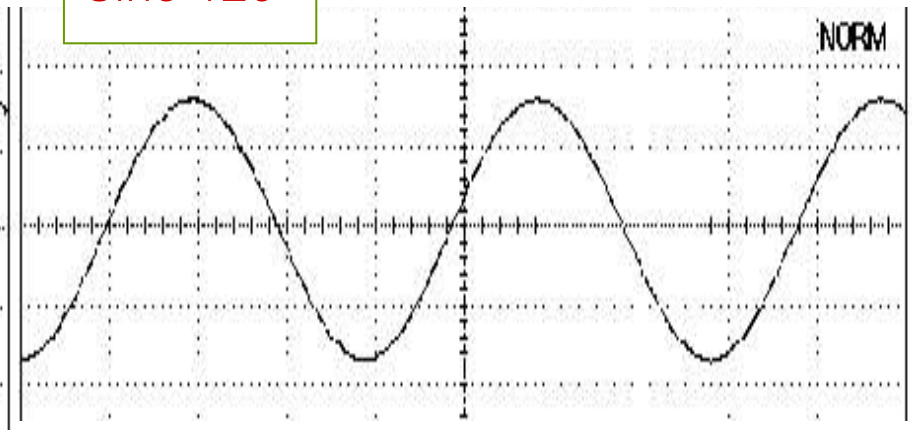


Sine  $0^\circ$



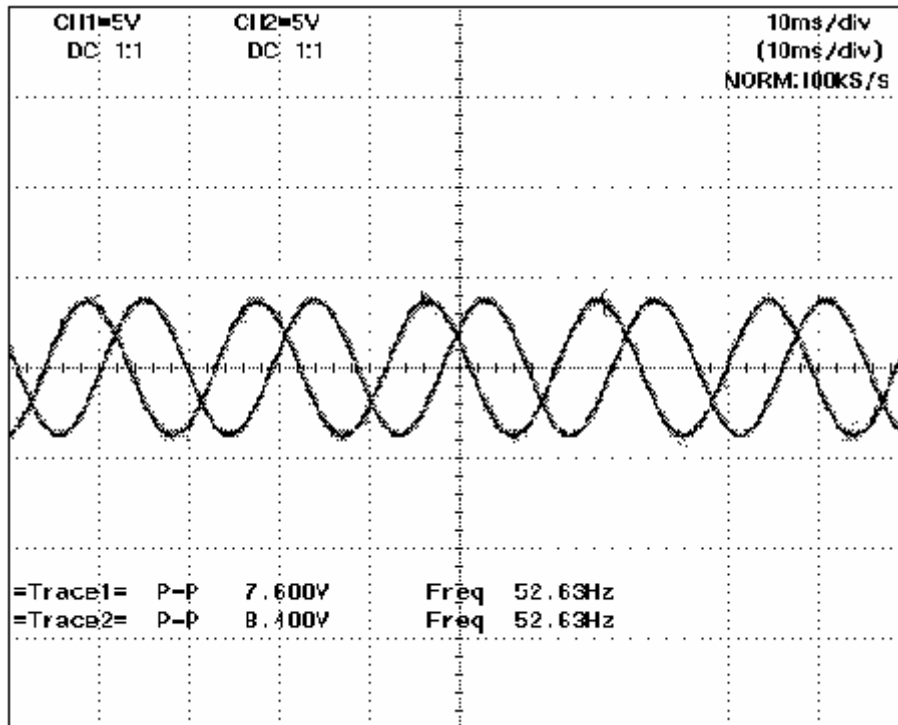
$V_{p-p} = 17.6V$

Sine  $120^\circ$



$V_{p-p} = 16.4V$

# ผลการสร้าง Sine 3 phase

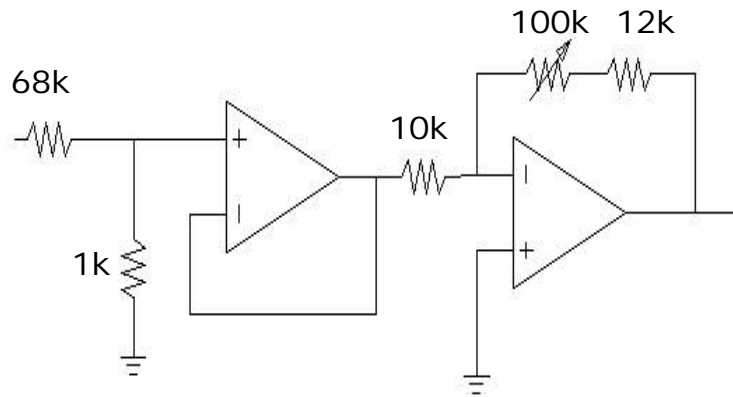


แสดงสัญญาณ output เทียบกับ  
สัญญาณ input sine  $0^\circ$

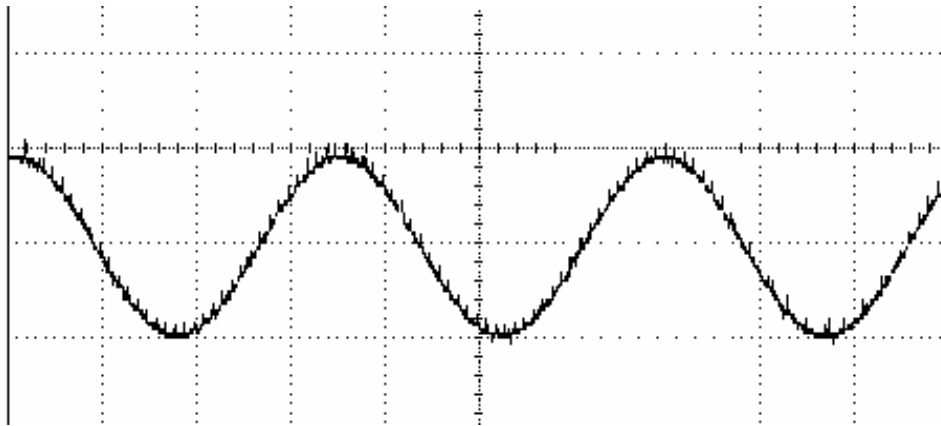
$V_{p-p}$  , channel 1 = 7.6 V

$V_{p-p}$  , channel 2 = 8.1 V

# วงจร Voltage Amplifier

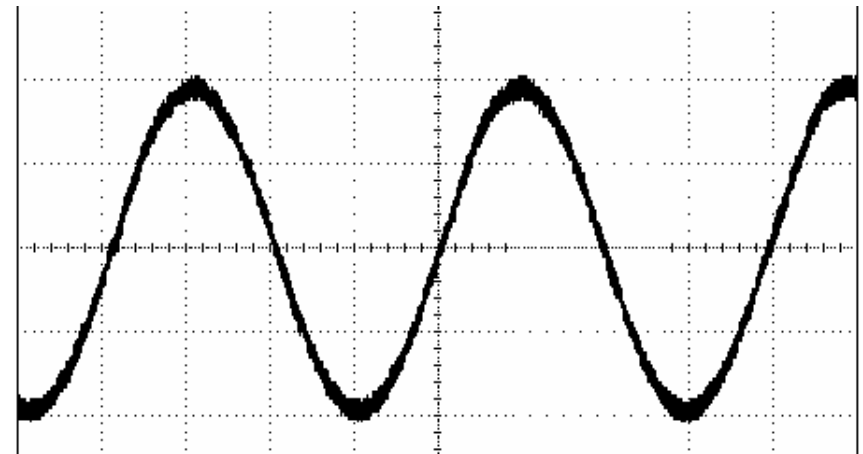


Minimum



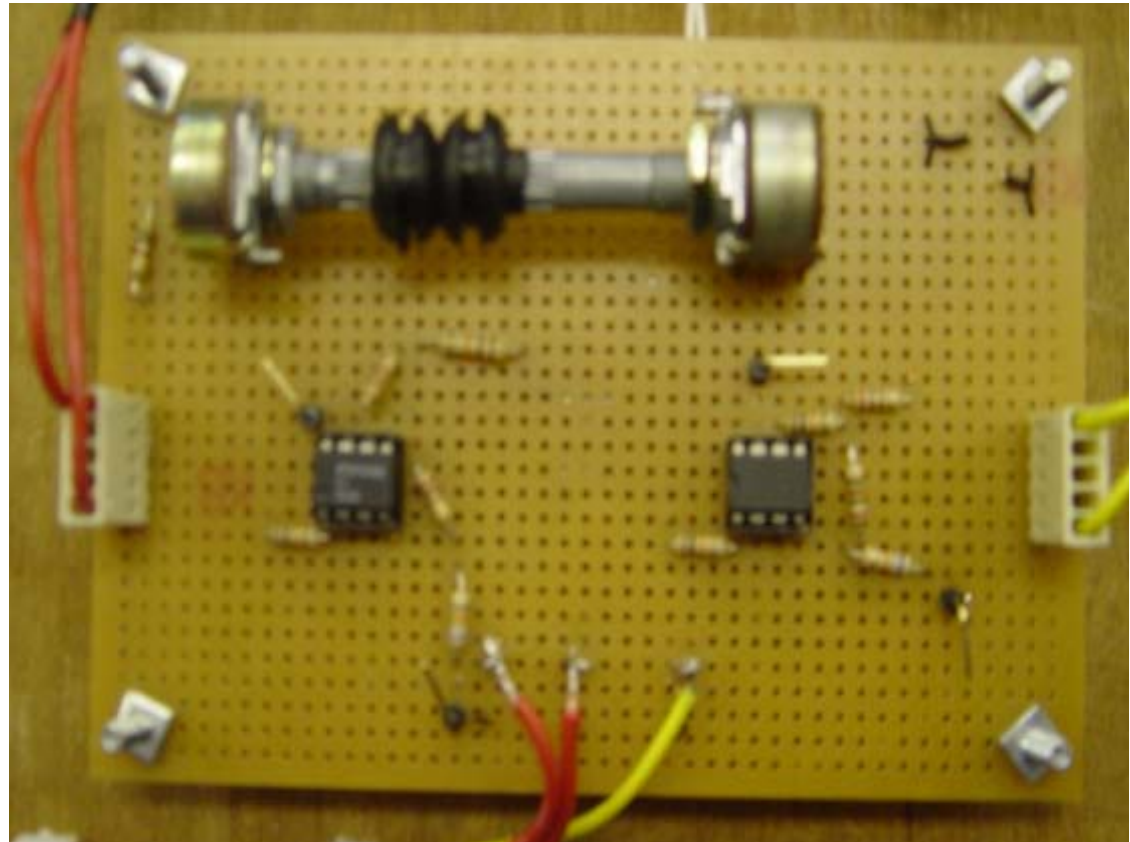
$V_{p-p} = 1V$

Maximum



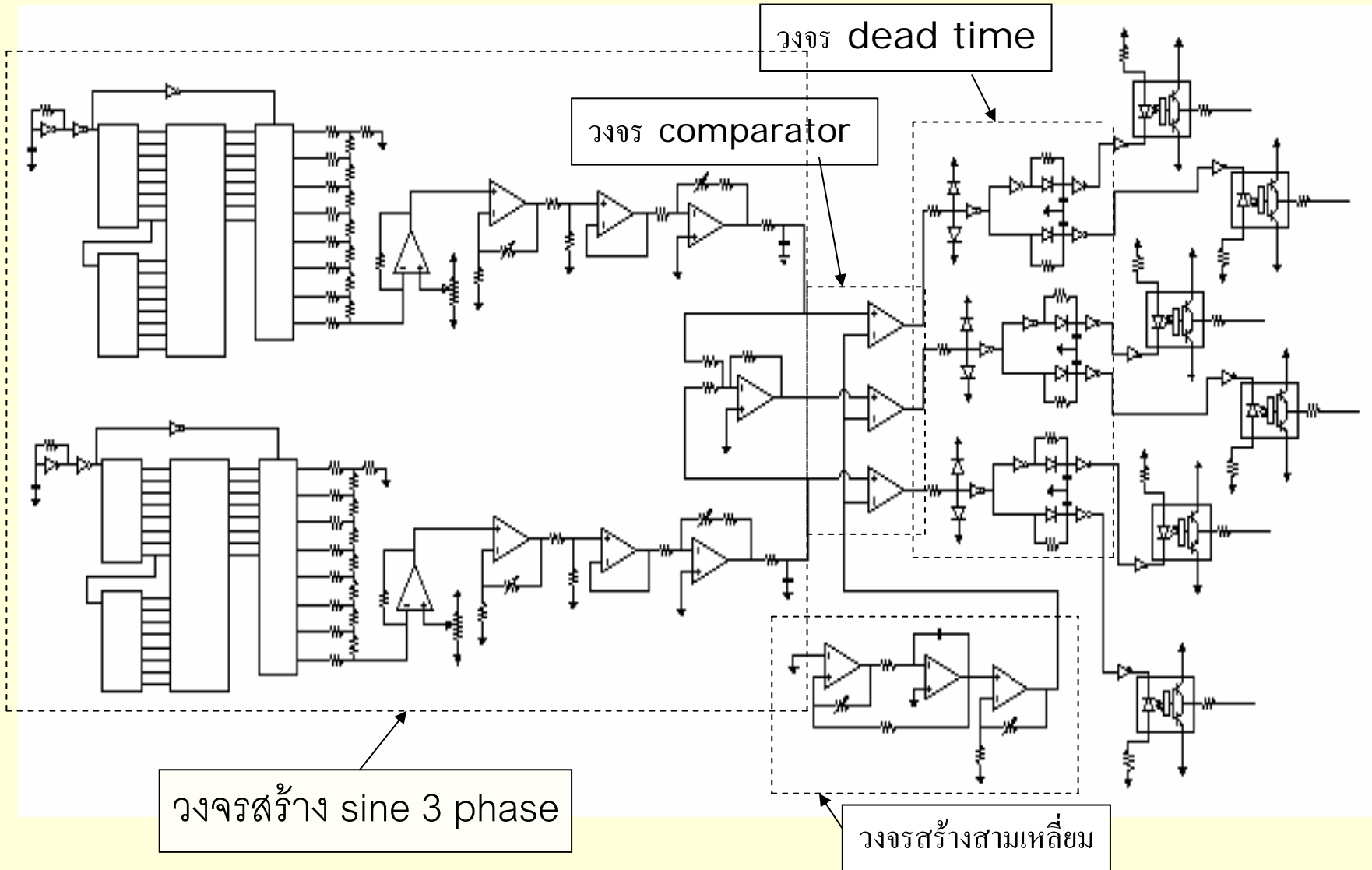
$V_{p-p} = 8.24V$

# ภาพแสดงวงจร Voltage Amplifier

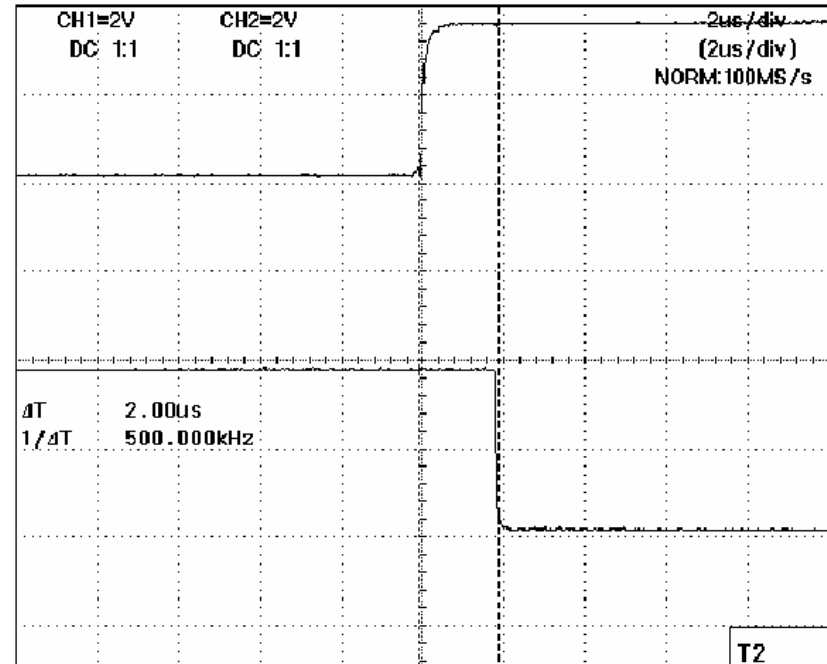
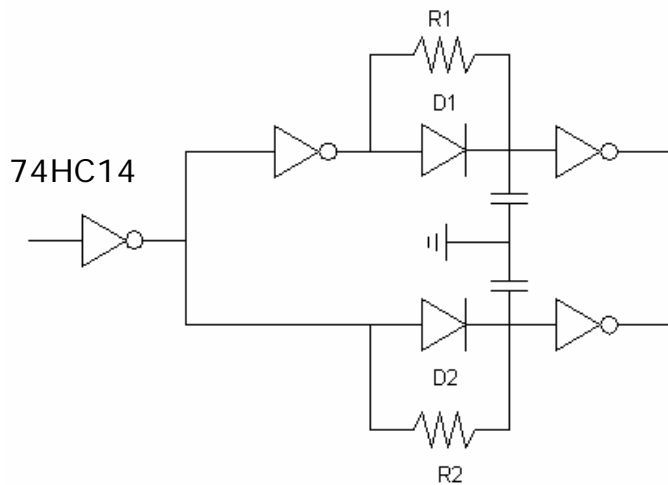




# วงจรรวมของ Control Circuit



# ผลการทดลองวงจร Dead Time



ช่วง Dead time =  $2\mu s$   
หรือที่ความถี่ = 500 kHz

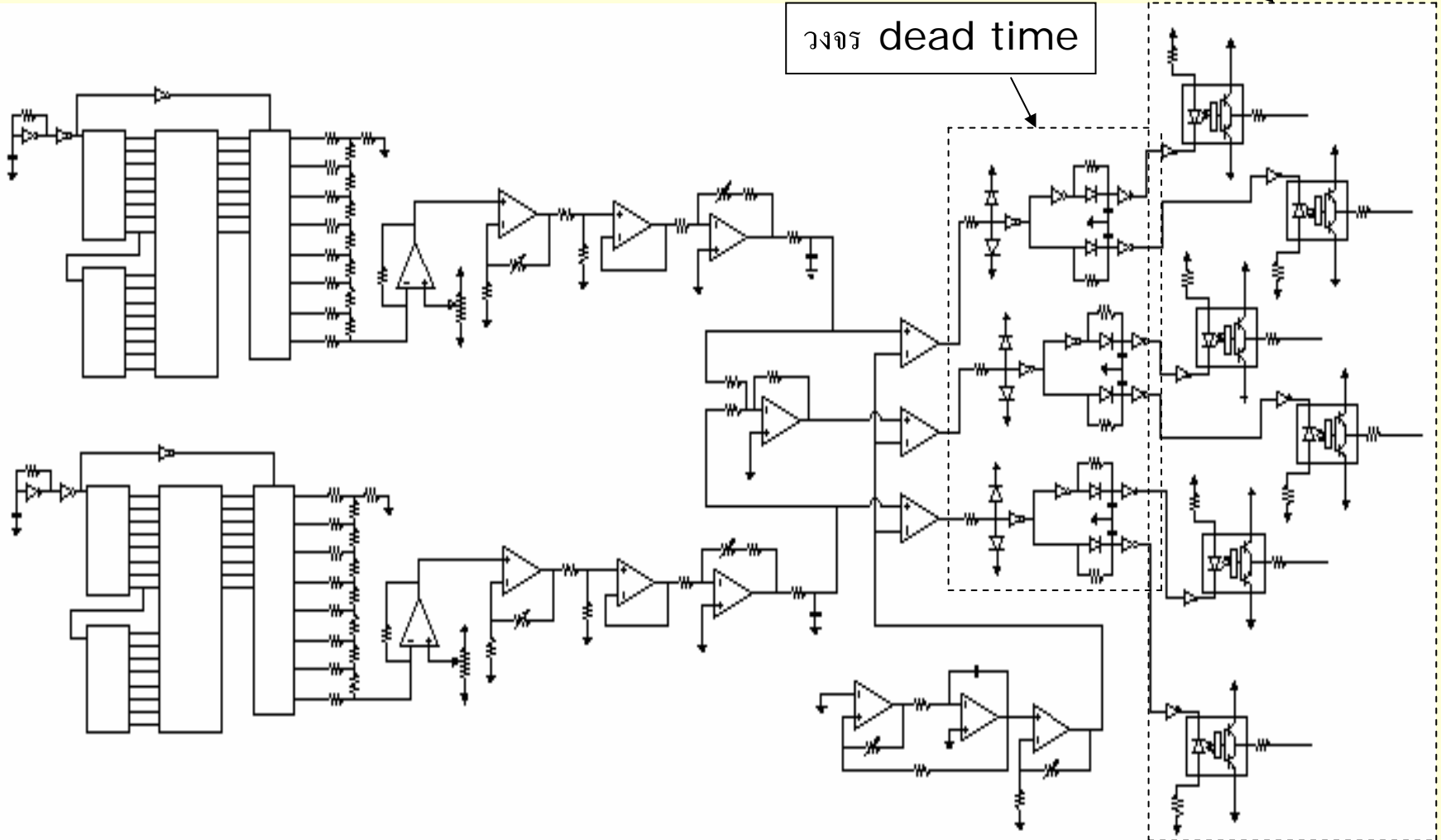




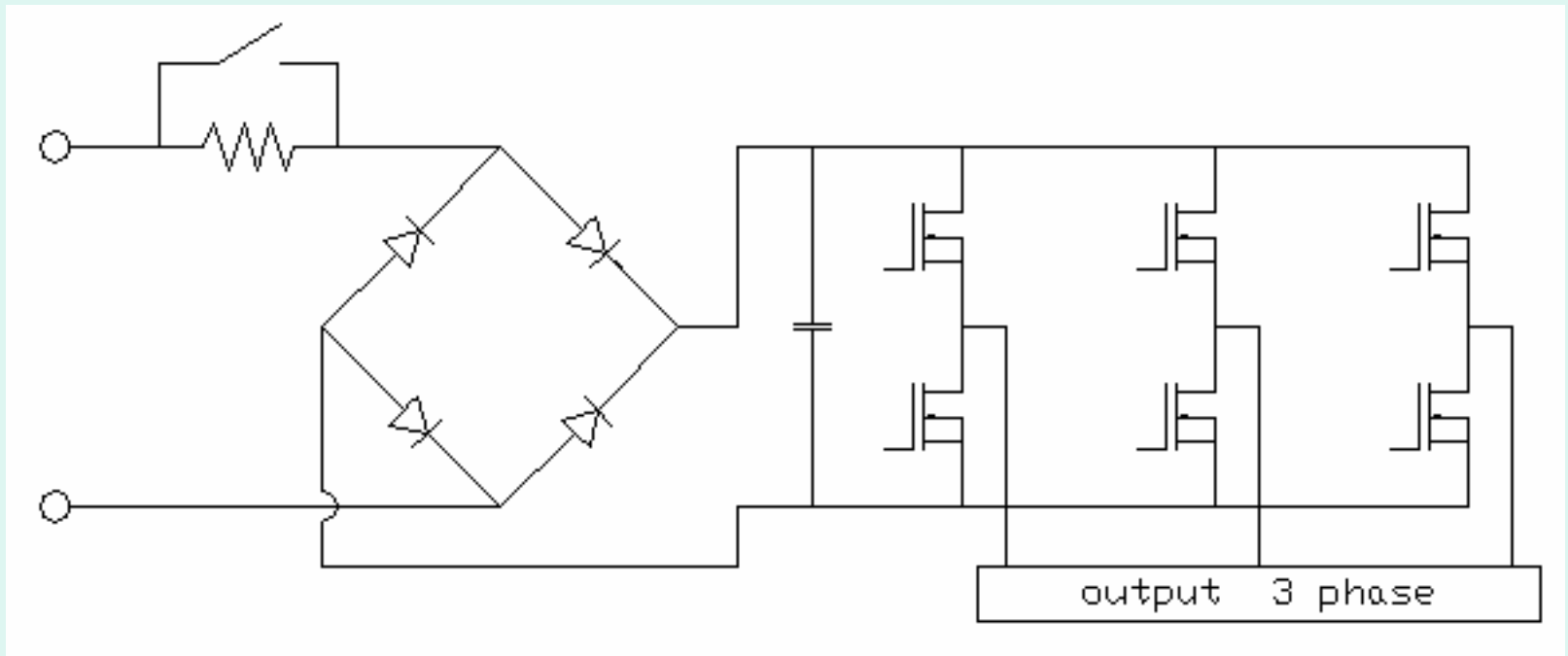
# วงจรรวมของ Control Circuit

Driver Mosfet

วงจร dead time



# ผลการทดลองของวงจร Main



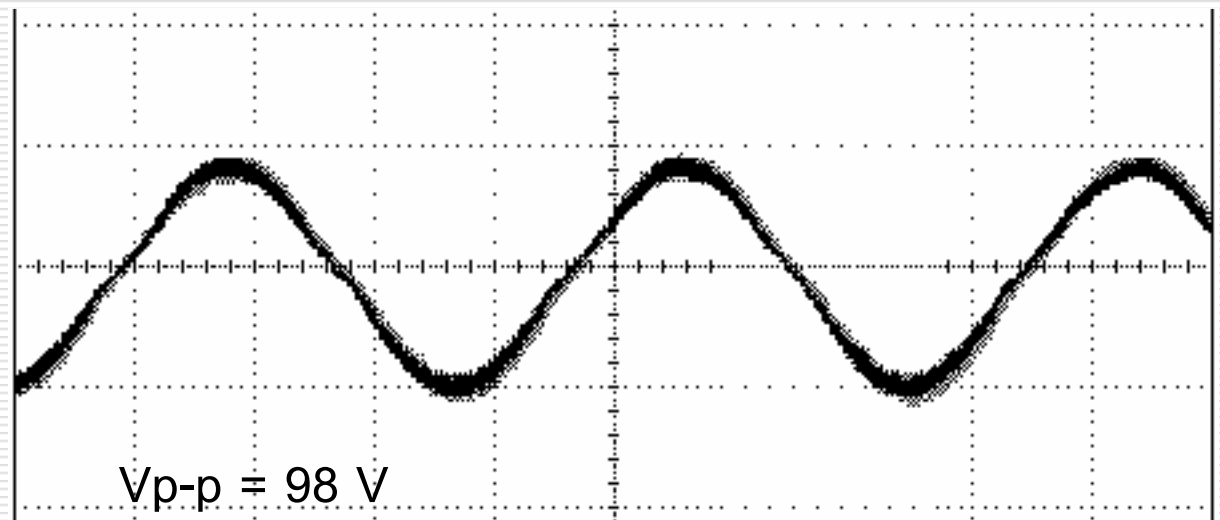
# ผลการทดลองวงจร Main

□ output ระหว่างเฟส A กับเฟส B

$f = 52.3 \text{ Hz}$

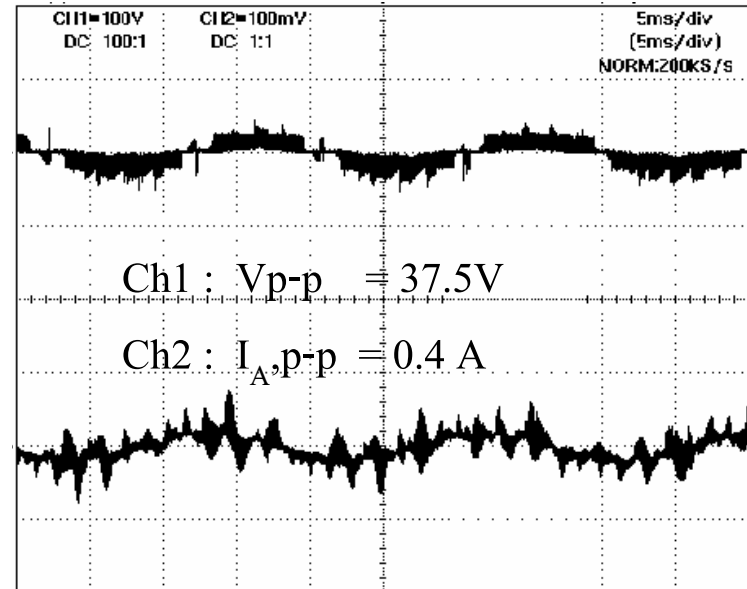
input 100 V

No-load

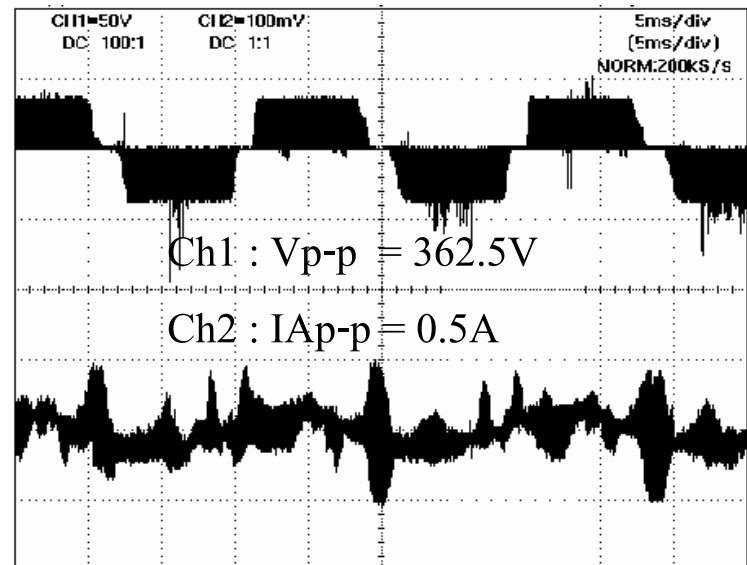


# ต่อ Resistive, Inductive Load

□ Input 300 V โหลด R 1 ตัว  
โหลด L 2 ตัว

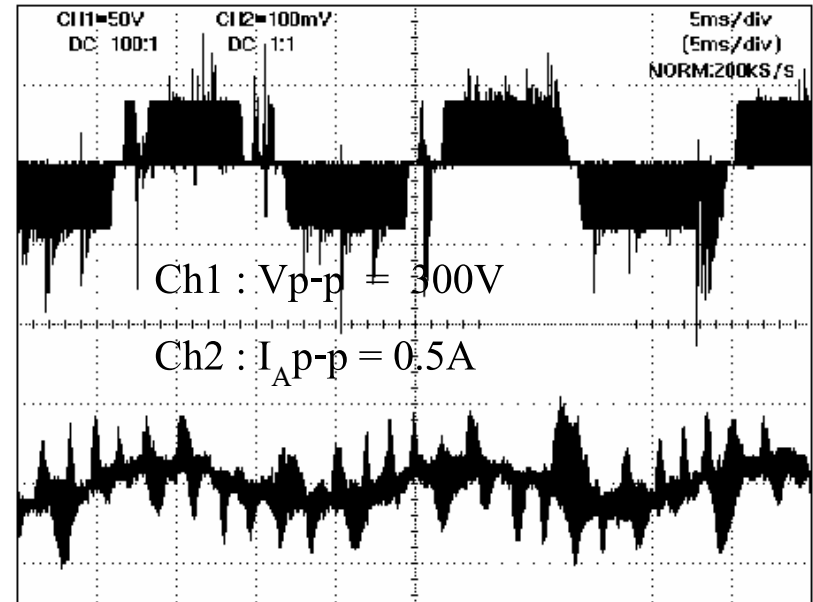


□ Input 300 Vต่อโหลด R 3 ตัว  
โหลด L 2 ตัว

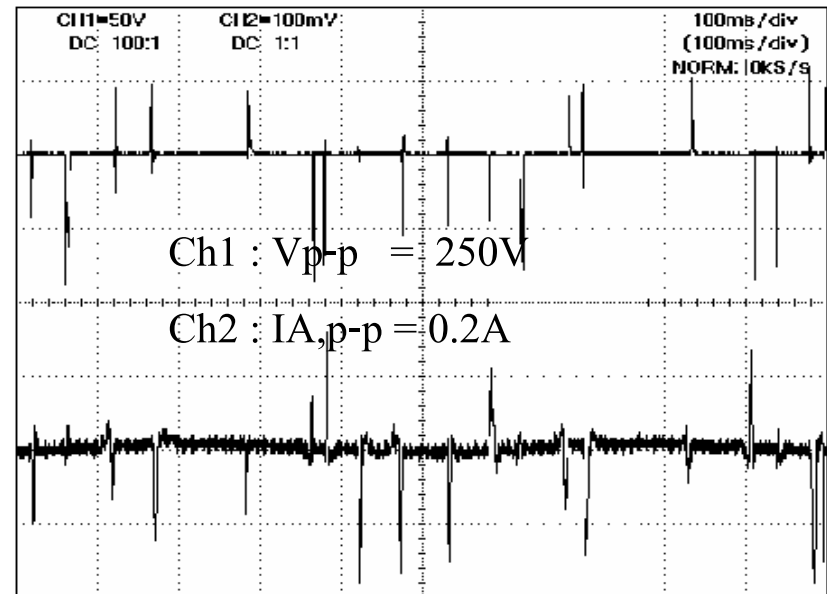


# ต่อ load เป็น motor 3 phase

□ Input 300 V ที่  $f_{\max}$

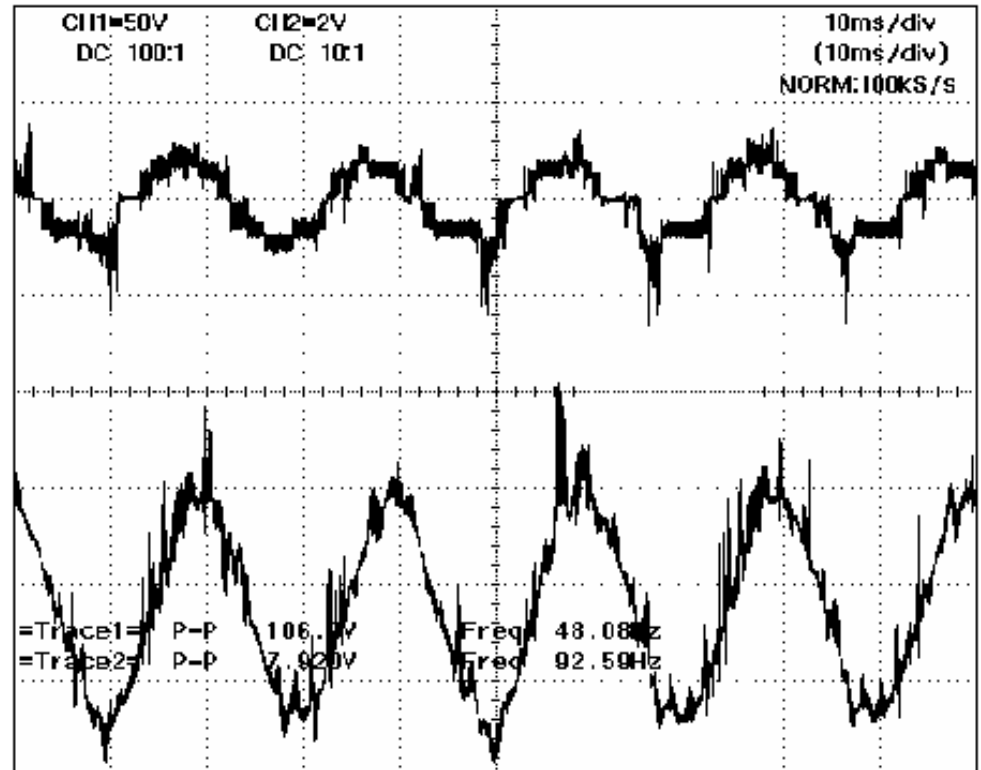


□ Input 300 V ที่  $f_{\min}$



# Load เป็น LIM

□ Input 150-200 V



Ch1 :  $V_{p-p} = 250V$

Ch2 :  $I_{A,p-p} = 2A$

# สรุปผลโครงการ

---

## ส่วนของงาน โครงสร้างแบบจำลอง

- มีการเปลี่ยนรางสัมผัสที่ใช้ในการจ่ายพลังงานให้กับรถไฟ
- ออกแบบโครงสร้างที่ใช้รับน้ำหนักของราง
- มีการคัดแปลงล้อที่ใช้ประกอบเพื่อให้รถวิ่งไปกับตัวรางได้ดียิ่งขึ้น และยังมีการปรับแต่งตัวรถไฟให้มีความเหมาะสมอีกด้วย
- เปลี่ยนและออกแบบแปร่งถ่านให้มีความแข็งแรงและเหมาะสม

# ส่วนของ Inverter

- มีการสร้างวงจร Inverter ทั้งในส่วนของ control circuit และ main circuit
- จากการทดลอง Inverter สามารถแปลงกระแสไฟจาก single phase ไปเป็น three phase ซึ่งสามารถนำไปควบคุมรถไฟฟ้าให้มีการปรับความเร็วได้โดยอาศัยการปรับความถี่





# ปัญหาและแนวทางแก้ไข



# ส่วนของโครงสร้าง

- รัศมีความโค้งของรางแคบจนเกินไป ถ้าสามารถปรับให้กว้างมากกว่านี้จะทำให้รถไฟ วิ่งได้คล่องตัวมากขึ้น
- ล้อที่ใช้ประกอบด้านข้างยังมีความฝืดอยู่ ต้องปรับปรุงแก้ไขในส่วนของความเลื่อนของล้อ และล้อที่อยู่ด้านล่างของตัวรถก็ควรจะมีล้อคู่ด้วยเช่นกัน

# ส่วนของ Inverter

- ตัววงจร Inverter ยังไม่มีการ feedback เพื่อควบคุมกระแสให้อยู่ในช่วงที่ต้องการ ดังนั้นควรใช้การควบคุมโดยใช้ PI controller ซึ่งจะมีความสะดวกด้านการป้องกันค่ากระแสที่เกินมากกว่าวงจรควบคุมที่ใช้อยู่ เพราะว่าการควบคุมกระแสจะเป็นไปอย่างอัตโนมัติ
- ปัญหาลำดับการเปิดสวิตช์ของวงจรควบคุม และวงจร main หากมีการลำดับสวิตช์ไม่ถูกต้อง จะทำให้เกิดการลัดวงจรระหว่าง Mosfet ได้ ควรเปิดวงจรควบคุมก่อนมีการเปิดวงจร main หรือใช้การ Interlocking โดย contactor relay เข้ามาช่วยควบคุมในการเปิด-ปิด สวิตช์

ขอขอบคุณ  
อาจารย์ทุกท่านที่มีส่วนให้งานนี้สำเร็จ  
โดย

นางสาวเบญญา ลัญจน์วัฒน์  
นายพรชัย อังกุตนาค



# Linear Induction Motor Model

EE2002-6

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. สัมฤทธิ์ หังสะสุตร

น.ส. เบญญา ลัญจนวัฒน์ รหัส 421765-0

นายน พรชัย อังกุลนาค รหัส 421801-6

# วัตถุประสงค์

---

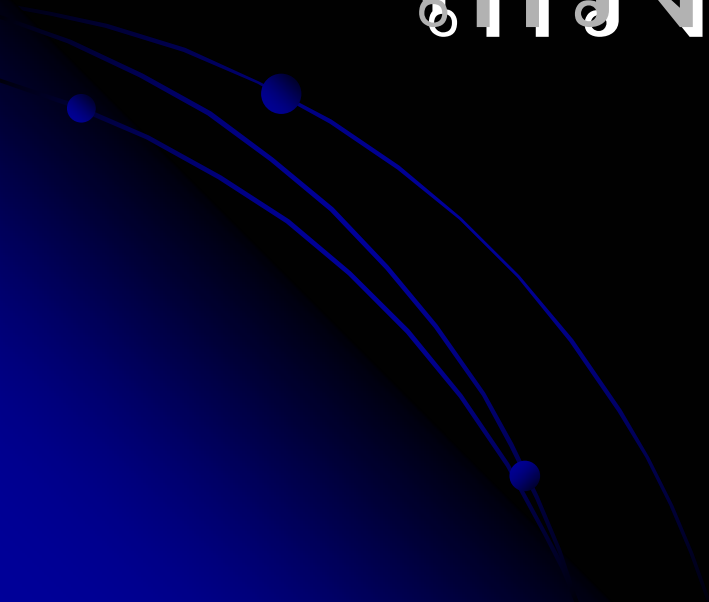
- ❑ เพื่อศึกษาและปรับปรุงการทำงานของ **Linear induction motor model**
  - ❑ เพื่อปรับปรุงระบบส่งกำลังไฟฟ้าของ **model**
  - ❑ เพื่อปรับปรุงรางและโครงสร้างของ **model**
  - ❑ ศึกษาและออกแบบ **Converter** 3 เฟส ปรับความถี่ได้
-

# ขอบข่ายของการทำงาน

---

- ปรับปรุงโครงสร้างของ **Induction motor** และออกแบบ **model**
  - ปรับปรุง จุดปฐมภูมิ (ตัวรถ) และ จุดทุติยภูมิ (ราง)
  - สร้าง **converter** เพื่อใช้ในการควบคุมความเร็ว
-

# การออกแบบบรารางและ โครงสร้างรอดไฟฟ้า





# ปัญหาของโครงสร้างจากโครงการเดิม

- การเคลื่อนที่ติดขัด เนื่องจากรัศมีความโค้งของรางนั้นแคบมากเมื่อเปรียบเทียบกับรถไฟฟ้า ทำให้เวลาเข้าโค้งติดขัด
- ชุดล้อที่ใช้ในการลดความเร็ว ที่ขนานกับตัวรางด้านบนมีจำนวนมากเกินไปอีกทั้งยังถูกยึดอยู่กับที่ เมื่อรถวิ่งมาในทางโค้งจะถูกบังคับไว้ด้วยชุดล้อเหล่านี้
- รางจ่ายพลังงานมีการชำรุดเสียหาย เนื่องจากรางจ่ายพลังงานนี้ทำจากอลูมิเนียม และคุณสมบัติของอลูมิเนียมนั้นมีความลื่นน้อย เมื่อเสียดสีกับแปลงถ่านแล้วเกิดคราบคาร์บอนเป็นอุปสรรคต่อการนำไฟฟ้า

# แนวทางการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นกับโครงการเดิม

ในประเด็นแรก หากต้องการแก้ปัญหาที่ราง เนื่องจากความโค้งของรางนั้นมากเกินไป หรือพูดอีกนัยหนึ่งนั่นคือ รัศมีความโค้งแคบเกินไป ดังนั้นถ้าเราขยายความกว้างของรางออกไปอีก จะทำให้รัศมีความโค้งกว้างกว่าเดิม จะทำให้รถไฟไฟฟ้าเลี้ยวโค้งได้ง่ายขึ้น

แบบที่สองคือ การแก้ไขที่รถไฟไฟฟ้า โดยการทำให้ล้อที่ประกอบรางที่ตำแหน่งหัวท้ายมีการยืดหยุ่นได้จาก นั่นคือหาวิธีการติดสปริงที่ด้านข้างของล้อตำแหน่งหัวท้าย เพื่อการยืดหยุ่นให้สัมผัสกับรางทั้งในเวลาเข้าโค้งและในทางตรง จะทำให้รถไฟวิ่งได้ดีขึ้น

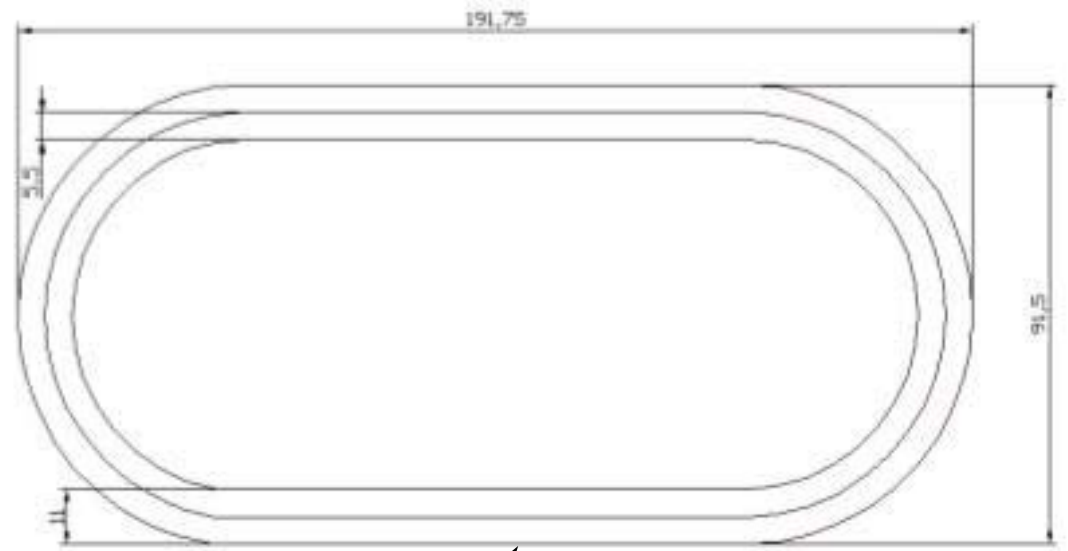
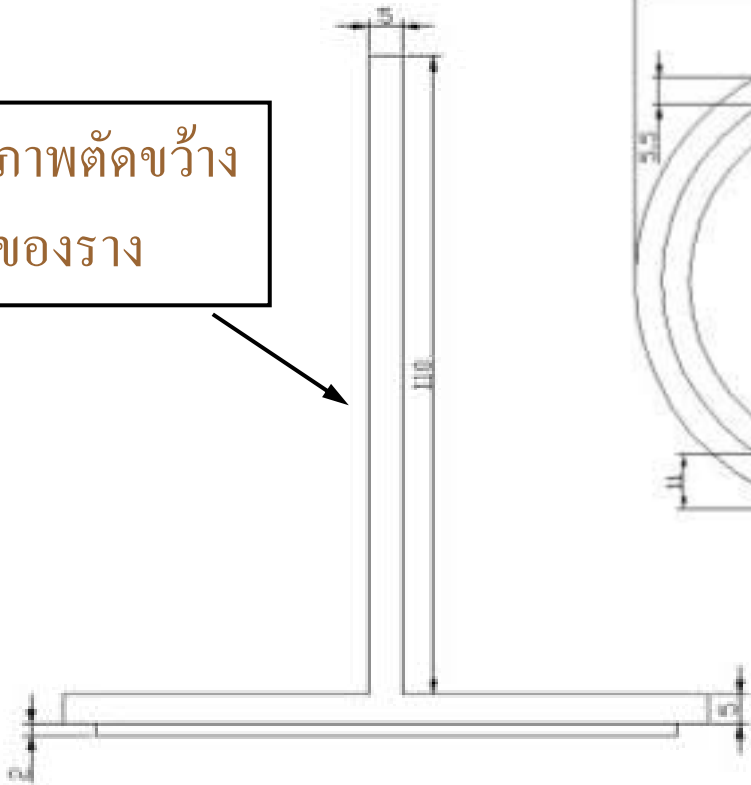
แบบสุดท้ายคือ การแก้ไขที่รถไฟไฟฟ้าเช่นเดียวกัน ด้วยการออกแบบโครงสร้างรถไฟไฟฟ้าขึ้นมาใหม่ โดยที่รถไฟไฟฟ้ามีจุดรับน้ำหนักเพียงสองจุดคือ ล้อที่เกาะอยู่กับสันของรางในลักษณะคล้ายกับกระเช้า ซึ่งเมื่อเข้าโค้งนั้นจะเป็นไปได้ง่ายกว่าแบบเดิมมาก เนื่องจากไม่มีล้อที่บังคับมากจนเกินไป

# โครงสร้างของราง

- เนื่องจากเป็นโครงการต่อเนื่อง ในส่วนของการออกแบบรางนั้นไม่มีความจำเป็นต้องออกแบบใหม่ สามารถนำรางเดิมนี้อำมาใช้งานได้ การออกแบบรางเดิมนั้นประกอบด้วยแผ่นเหล็กและอลูมิเนียมประกบกัน ในส่วนที่เป็นเหล็ก จะประกอบเป็นรูปตัวที (T) เพื่อใช้เป็นตัวยึดเกาะของรางรถไฟ และยึดติดกับโครงสร้างได้ง่าย
- แต่เนื่องจากรางเดิมมีความโค้งที่ไม่เรียบจึงมีการแก้ไข โดยการเคาะรางใหม่

# ภาพโครงสร้างของราง

ภาพตัดขวาง  
ของราง

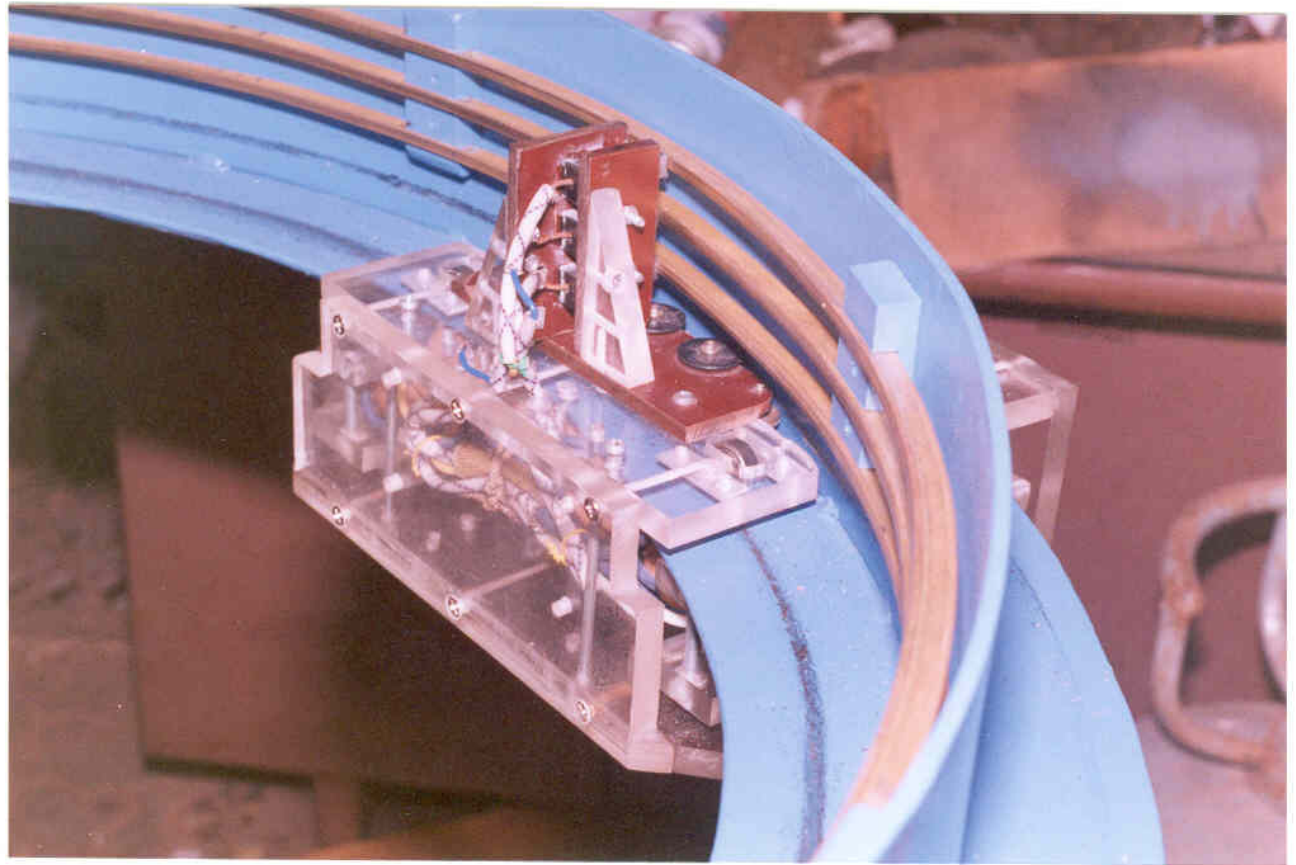


ภาพ Top view ของราง

# ภาพของรางจริงที่ทำการติดตั้งจ่ายพลังงานและปรับปรุง แล้ว



# รางจ่ายพลังงานและรถไฟฟ้าขนาดเล็กวิ่งโค้ง





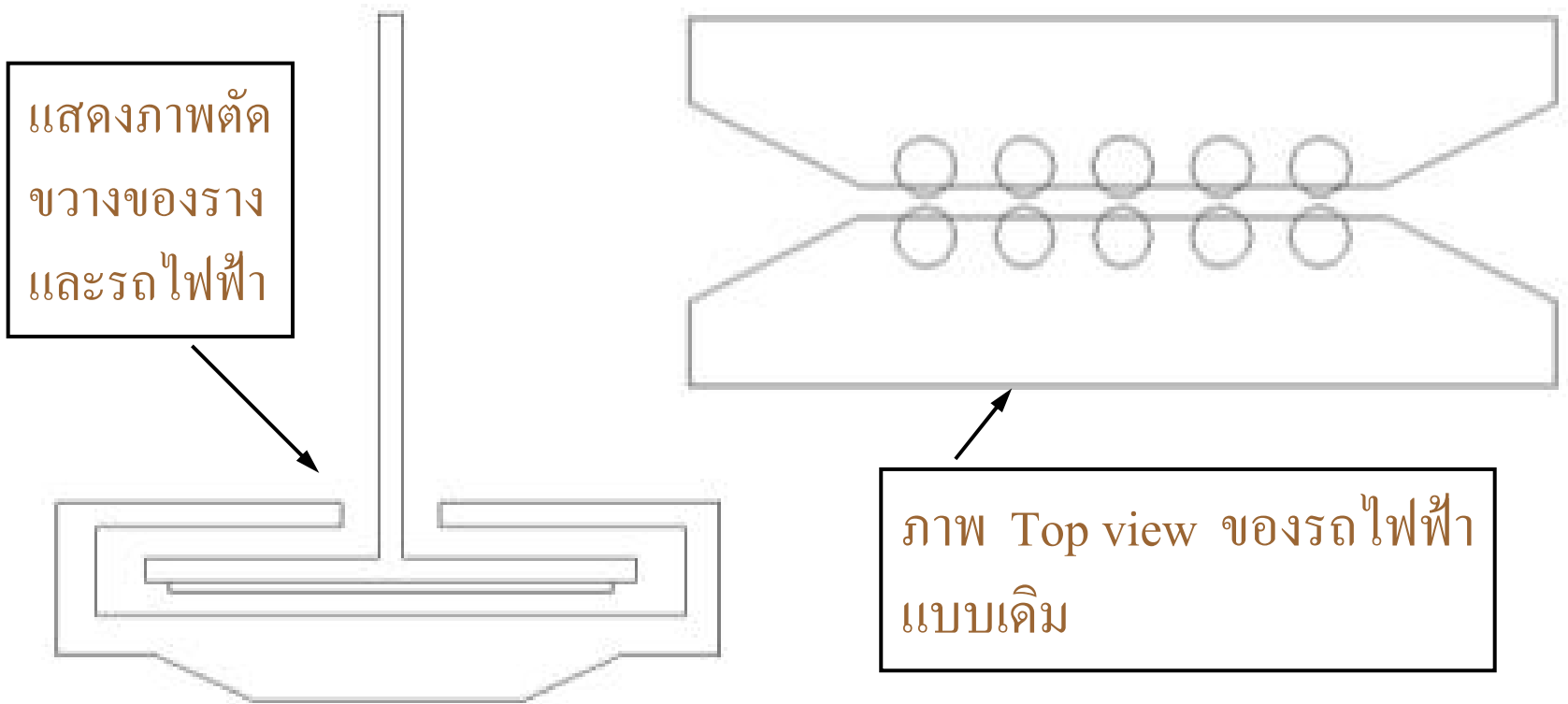
# โครงสร้างของรถไฟฟ้า

## ■ ลักษณะโครงสร้างของรถไฟฟ้าจากโครงงานรุ่นที่แล้ว

จากโครงงานรุ่นที่แล้วนั้น โครงสร้างของตัวรถไฟฟ้ามีลักษณะแบบโอบราจไว้ทั้งสองข้าง มีล้อประกอบทางด้านบน ที่ใช้ลดแรงเสียดทานขณะที่ยังไม่ได้จ่ายไฟ ล้อประกอบด้านล่าง ใช้ลดแรงเสียดทานขณะที่จ่ายไฟแล้วและยังใช้ป้องกันจุดติดกันระหว่างรางและรถไฟฟ้าด้วย และล้อทางซ้ายและขวา ใช้ในการประกอบด้านข้าง

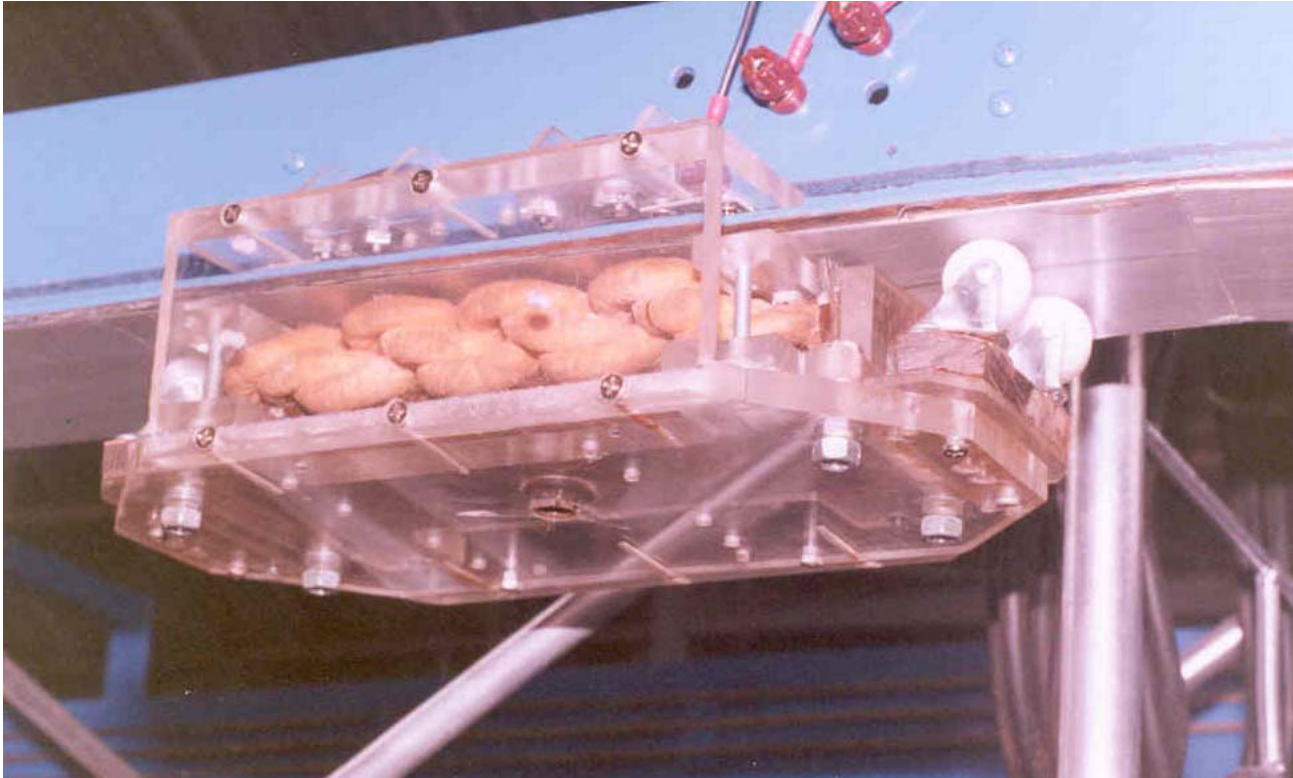
จะเห็นว่าชุดล้อที่เรียงกันเป็นจำนวนมาก ที่ใช้ในการบังคับล้อให้วิ่งไปตามตัวรางนั้นมีจำนวนมากเกินไป และล้อที่อยู่ทางหัวท้ายถูกตรึงให้อยู่กับที่ ไม่สามารถยืดหยุ่นหรือเคลื่อนที่ได้

# ภาพโครงสร้างของรถไฟฟ้า

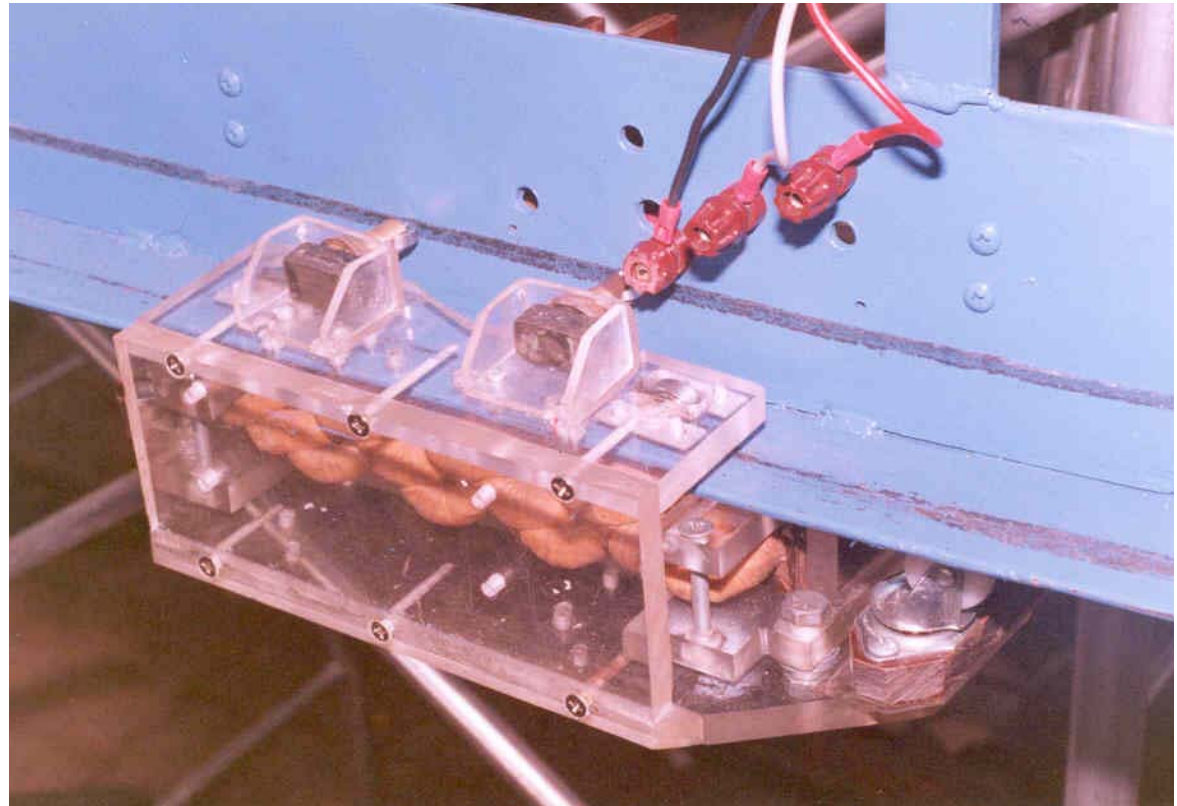




ภาพแสดง โครงสร้างของรถไฟฟ้าขณะที่ยู่บนราง



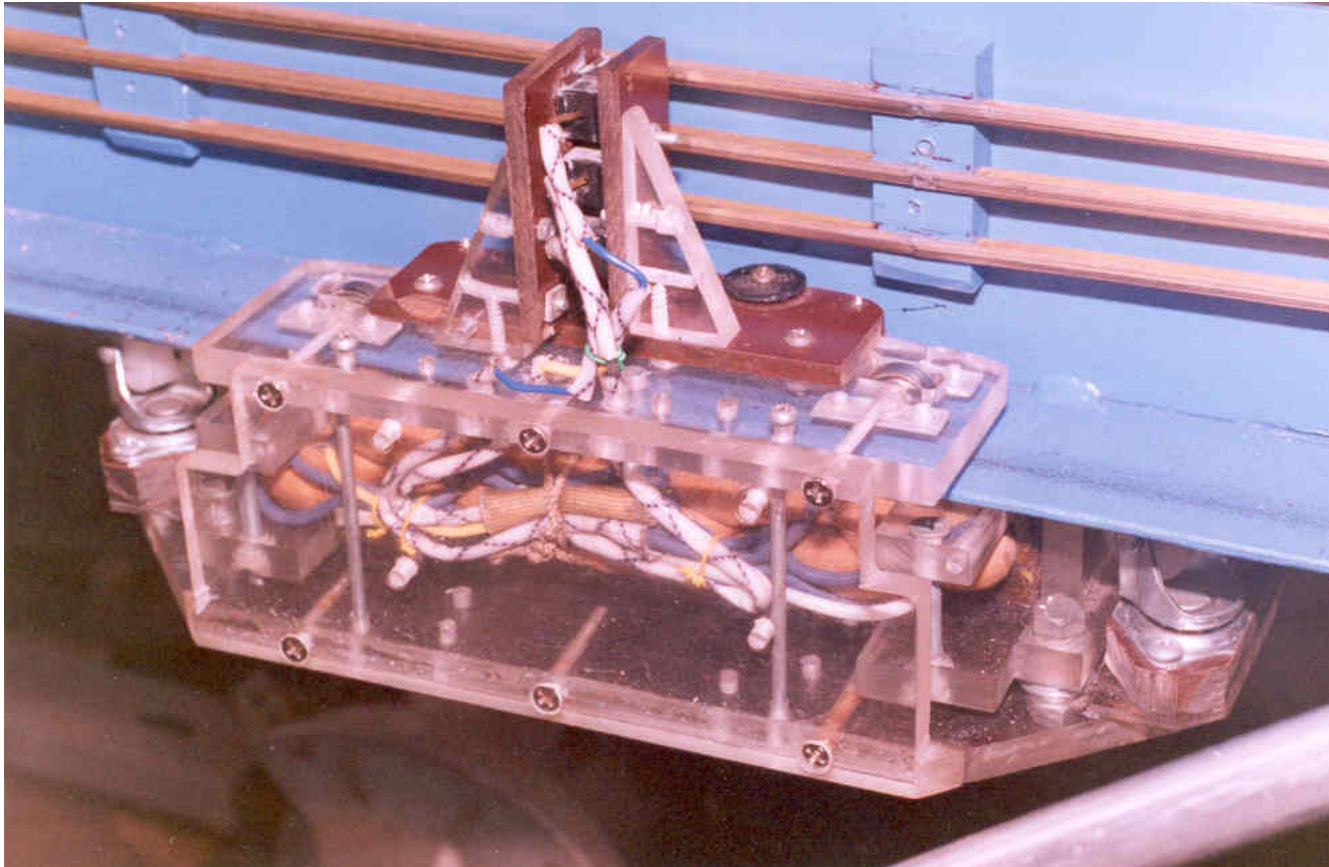
# ภาพแสดงล้อที่สามารถยืดหยุ่นได้ติดอยู่บนตัวรถ



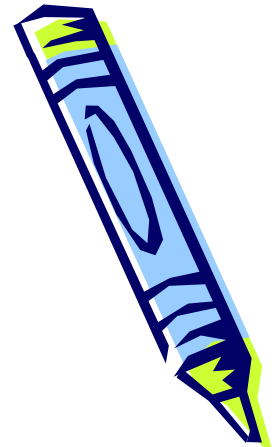
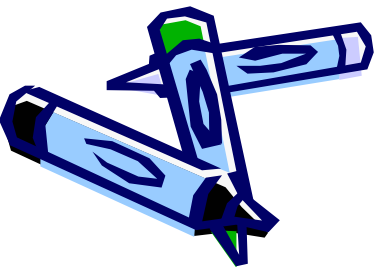
# ระบบป้อนพลังงาน

- ◆ การให้รถไฟฟ้าเคลื่อนที่ไปตามรางได้ จะต้องมีการป้อนพลังงานให้กับตัวรถไฟฟ้าด้วยแรงดันไฟฟ้า 0-220 โวลต์ 3 สาย เนื่องจากตัวรถไฟฟ้ามีการเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลา ดังนั้นไม่สามารถป้อนพลังงานไฟฟ้าให้กับตัวรถไฟฟ้าได้โดยตรง
- ◆ การออกแบบระบบการป้อนพลังงานให้กับตัวรถไฟฟ้า โดยการฝังแผ่นตัวนำทองเหลืองขนาด 4 มม. จำนวน 3 เส้น บนฉนวนเบกาไลต์ที่ติดอยู่เป็นช่วงตามความแข็งแรงของรางทองเหลือง และดึงพลังงานจากตัวนำทองเหลืองผ่านแปรงถ่าน เข้าสู่ตัวรถไฟฟ้า ซึ่งแปรงถ่านมีสปริงเป็นตัวกดให้หน้าสัมผัสของแปรงถ่านสัมผัสกับตัวนำทองเหลืองตลอดการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า แปรงถ่านมีคุณสมบัติลดการเกิดประกายไฟและลดแรงเสียดทานขณะรถไฟฟ้าเคลื่อนที่

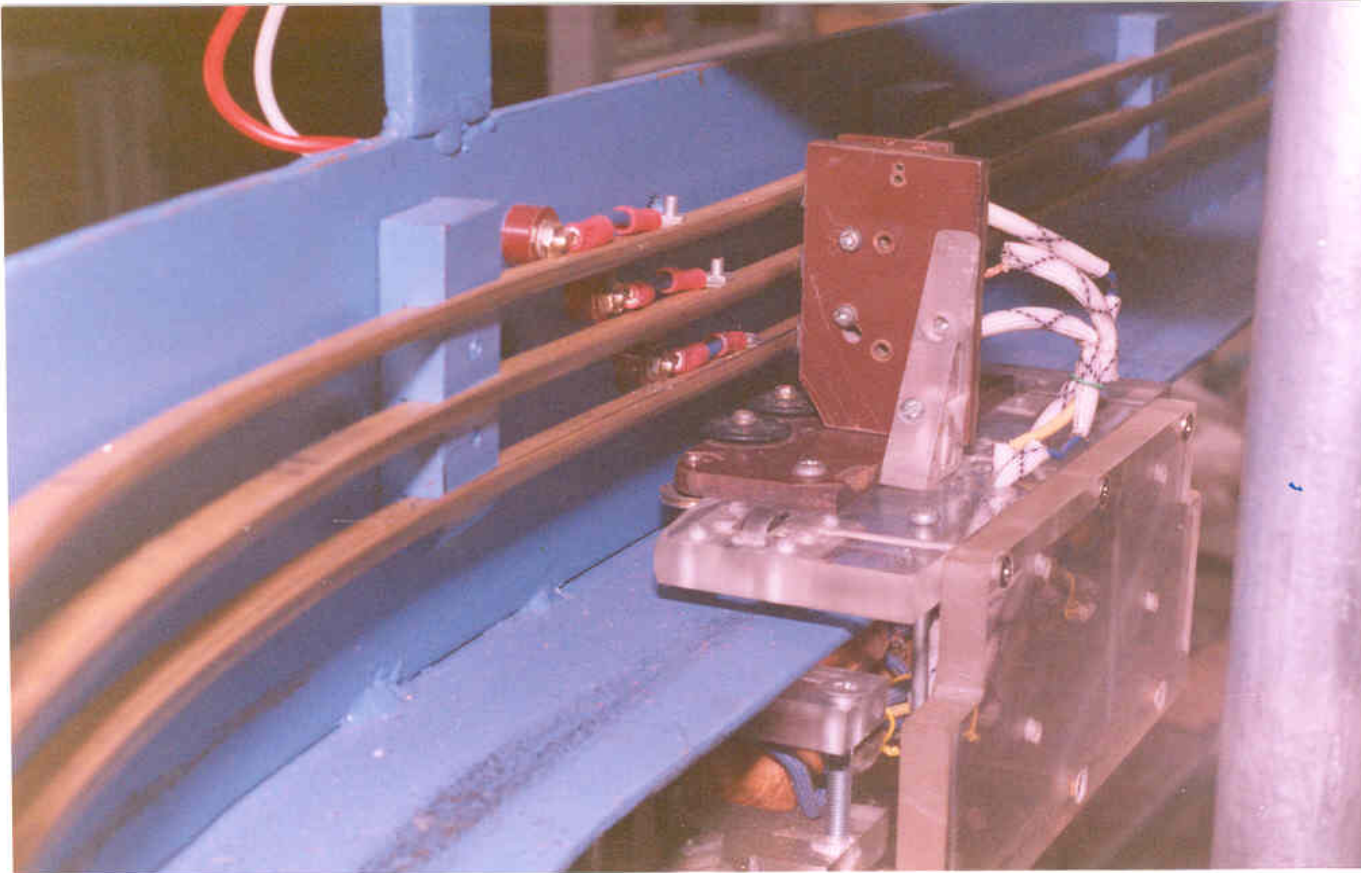




ภาพแสดงรางจ่ายพลังงาน 3 เส้นที่ยึดติดกับรางด้วย  
ฉนวนเบกาไลต์ ที่สัมผัสอยู่กับแปรงถ่าน



เนื่องจากไม่สามารถจ่ายพลังงานให้กับรถไฟฟ้าได้โดยตรง ดังนั้น  
จึงต้องจ่ายพลังงานผ่านรางจ่ายพลังงาน



ภาพแสดงการจ่ายพลังงานให้กับรางเพื่อป้อนเข้าสู่แปลงถ่าน

# สรุปความก้าวหน้าของงาน ด้านโครงสร้าง

# ส่วนของราง

---

- มีการเปลี่ยนรางสัมผัสที่ใช้ในการจ่ายพลังงานให้กับรถไฟ
- ออกแบบโครงสร้างที่ใช้รับน้ำหนักของราง

# ส่วนของรถไฟฟ้า

---

- มีการดัดแปลงล้อที่ใช้ระคองเพื่อให้รถวิ่งไปกับตัวรางได้ดียิ่งขึ้น และยังมีการปรับแต่งตัวรถไฟฟ้าให้มีความเหมาะสมอีกด้วย
- เปลี่ยนและออกแบบแปรงถ่านให้มีความแข็งแรงและเหมาะสม





THE END

