บทที่ 3

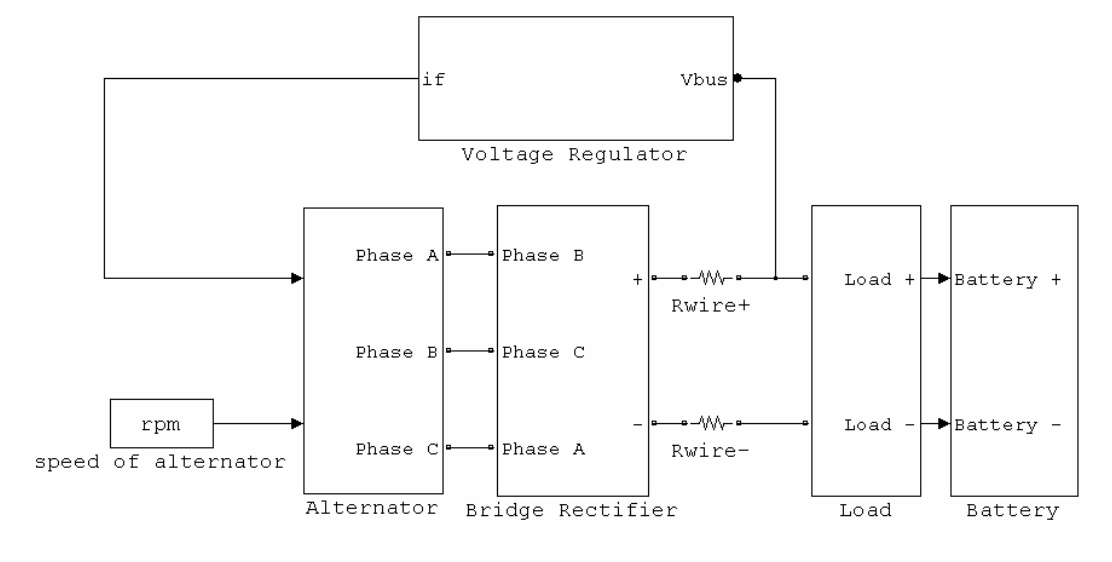
วิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้มีความมุ่งหวังที่จะทดสอบการผลิตกำลังไฟฟ้าอัลเทอร์เนเตอร์ภายใต้การควบคุมกระแสขดลวดสนามโรเตอร์หรือกระแสฟิลด์ เพื่อให้ผลิตกำลังไฟฟ้าภายใต้เงื่อนไขความต้องการของภาระและการประจุไฟเข้าแบตเตอรี่ เป็นที่น่าสนใจว่าระบบอัลเทอร์เนเตอร์ที่ใช้อยู่ปัจจุบัน แบตเตอรี่จะยังคงให้ความเป็นอิสระในการผลิตกำลังไฟฟ้าของอัลเทอร์เนเตอร์ซึ่งความเป็นอิสระนี้เกิดขึ้นได้เนื่องจากความแตกต่างทางด้านแรงดันไฟฟ้าระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่ขณะเปิดวงจรกับแรงดันบัสไฟฟ้า แต่ความเป็นอิสระของแบตเตอรี่ไม่ได้ถูกนำมาใช้งานเพื่อประโยชน์ในการควบคุมกำลังไฟฟ้าอย่างเด่นชัด หรือกล่าวให้ง่ายก็คือไม่ได้ใช้ความเป็นอิสระที่แบตเตอรี่ได้ให้มาทั้งหมด เพียงแต่มุ่งเน้นไปที่วิธีการควบคุมแรงดันบัสไฟฟ้าซึ่งถือว่าเป็นจุดพิกัดแรงดันไฟฟ้าของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถยอมรับและทำงานได้เท่านั้น จึงเป็นที่มาของวงจรโวลต์เตจเร็กกูเลเตอร์หรือวงจรควบคุมแรงดันบัสไฟฟ้าที่ใช้กันในระบบปัจจุบัน ส่วนการควบคุมกำลังไฟฟ้าอัลเทอร์เนเตอร์ที่ได้จากแนวคิดดังกล่าวยังไม่มีการระบุที่ชัดเจนถึงผลลัพธ์ที่ได้ต่อระบบอัลเทอร์เนเตอร์ว่าเป็นผลดีหรือผลเสียมากน้อยเพียงใด จึงเป็นเหตุจูงใจให้ทำการศึกษาและทดสอบการทำงานของระบบดังกล่าวภายใต้แนวคิดที่นำเสนอ ด้วยเหตุที่ระบบอัลเทอร์เนเตอร์มีภาพรวมที่กว้างมาก ขอบเขตการวิจัยจึงได้กำหนดให้ทำการทดสอบในส่วนที่เป็นพื้นฐานและเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญต่อระบบอัลเทอร์เนเตอร์สำหรับใช้ในด้านการจัดการพลังงานของรถยนต์ คือ การควบคุมกำลังไฟฟ้าที่อัลเทอร์เนเตอร์ผลิตได้ โดยงานวิจัยชิ้นนี้จะเน้นที่กระบวนการประจุไฟแบตเตอรี่เนื่องจากแบตเตอรี่มีความเป็นอิสระที่จะให้อัลเทอร์เนเตอร์ผลิตกำลังไฟฟ้า และการนำไปใช้จริงในระบบอัลเทอร์เนเตอร์ของรถยนต์ จากวรรณกรรมปริทัศน์ จะพบการควบคุมกำลังไฟฟ้าอัลเทอร์เนเตอร์ต้องอาศัยวงจรที่ซับซ้อนและการคิดค้นพัฒนาแบบต่างๆ เน้นการใช้งานในรถยนต์ขับเคลื่อนไฟฟ้าร่วม (HEV) หากสามารถใช้วงจรทั่วๆไปมาประยุกต์ใช้กับรถยนต์ปัจจุบันสำหรับควบคุมกำลังไฟฟ้าอัลเทอร์เนเตอร์ได้ก็จะเป็นผลดีต่อการพัฒนาระบบไฟฟ้ารถยนต์อีกแนวทางหนึ่ง

การจำลองระบบกำลังไฟฟ้า เพื่อศึกษาผลการทำงานก่อนนำไปสร้างเป็นระบบต้นแบบ มีความสำคัญอย่างยิ่งทั้งในขั้นตอนการออกแบบและปรับปรุงระบบไฟฟ้า ให้มีเสถียรภาพและมีความเชื่อถือได้ อย่างไรก็ตาม แบบจำลองของอัลเทอร์เนเตอร์เป็นกุญแจสำคัญที่จะไขปริศนาว่า การนำเทคนิคและหลักการทางอิเล็กทรอนิกส์กำลังต่างๆ มาประยุกต์ใช้เพื่อ

ควบคุมการผลิตของอัลเทอร์เนเตอร์ จะสามารถเพิ่มกำลังเอาต์พุตได้สูงขึ้นเท่าใด เพื่อเป็นการบ่งบอกถึงความสมบูรณ์ของการควบคุมกำลังไฟฟ้าอัลเทอร์เนเตอร์ที่จะสามารถนำไปใช้ในรถยนต์ ซึ่งการสร้างแบบจำลองของอัลเทอร์เนเตอร์โดยอาศัยข้อมูลจากผลการทดลองคุณลักษณะก็เป็นวิธีหนึ่งที่ง่ายและมีความแม่นยำสูง จากนั้นประยุกต์เทคนิคควบคุมเพื่อดูผลการทำงานของระบบควบคุมกำลังไฟฟ้า การจำลองระบบกำลังไฟฟ้ารถยนต์มีวิธีการ ดังต่อไปนี้

3.1 การจำลองระบบกำลังไฟฟ้ารถยนต์บนโปรแกรม Matlab/Simulink

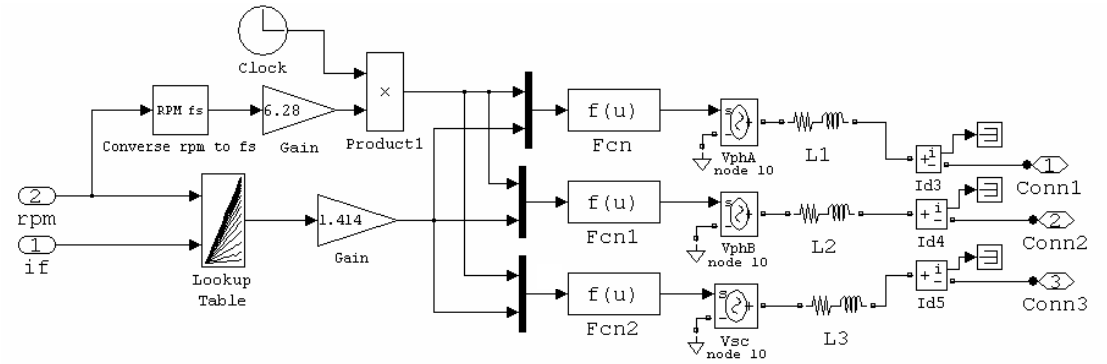


รูปที่ 3.1 แผนผังแบบจำลองกำลังไฟฟ้าอัลเทอร์เนเตอร์

แบบจำลองระบบกำลังไฟฟ้าได้สร้างขึ้นสำหรับจำลองการทำงานบนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ดังแสดงในรูปที่ 3.1 เพื่อวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าอัลเทอร์เนเตอร์ โดยมีส่วนประกอบ ดังนี้

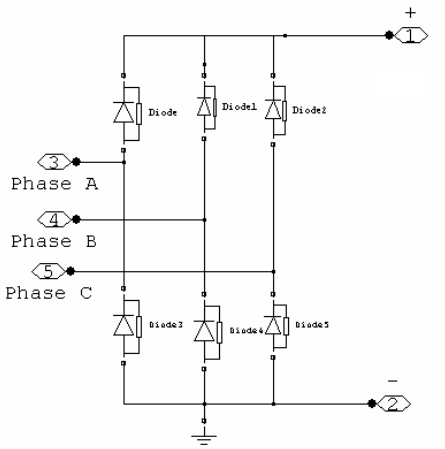
- อัลเทอร์เนเตอร์ เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำต้านกลับเป็นสัญญาณรูปคลื่นไซน์ ซึ่งอาศัยค่าความเร็วรอบต่อนาทีของอัลเทอร์เนเตอร์ (rpm) ต่อไปนี้ จะขอเรียกเป็นความเร็วรอบอัลเทอร์เนเตอร์และค่ากระแสขดลวดสนามสนามแม่เหล็กหรือกระแสฟิลด์ โดยกำหนดมาจากความต้องการกำลังไฟฟ้าของภาระและแบตเตอรี่ สำหรับหาค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (V_s) ด้วยวิธีการค้นหาจากข้อมูล (lookup table) ที่ทดสอบเปิดวงจร เพื่อเป็นแหล่งจ่ายแรงเคลื่อนไฟฟ้าของอัลเทอร์เนเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ค่าเกน (gain) มีไว้เพื่อให้ได้ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำสัญญาณรูปคลื่นไซน์ของอัลเทอร์เนเตอร์เป็นค่าสูงสุด (peak value)

ความเร็วรอบอัลเทอร์เนเตอร์เมื่อเปลี่ยนเป็นความถี่ทางไฟฟ้า (f_s) จะเกี่ยวข้องกับจำนวนโพลของอัลเทอร์เนเตอร์ ในที่นี้ จำนวนโพลของอัลเทอร์เนเตอร์ที่ทดสอบเท่ากับ 6 จึงเป็นผลให้ค่าความเร็วรอบอัลเทอร์เนเตอร์เป็น 10 เท่าของความถี่ทางไฟฟ้าขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และความถี่ทางไฟฟ้าจะถูกป้อนให้กับฟังก์ชันไซน์ โดยในแต่ละเฟสมีมุมต่างกัน 120 องศา ความเหนี่ยวนำซิงโครนัสอาร์เมเจอร์สามารถหาได้จากแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำและกระแสลัดวงจรของอัลเทอร์เนเตอร์ ส่วนค่าความต้านทานอาร์เมเจอร์ได้มาจากการวัดค่าโดยตรงด้วยการป้อนกระแสตรงให้กับขดลวดสเตเตอร์จากนั้นวัดค่ากระแสที่ไหลผ่านขดลวดสเตเตอร์และแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม จะได้ค่าความต้านทาน 58 $m\Omega$



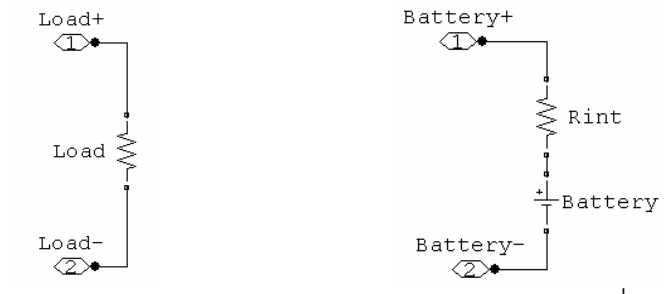
รูปที่ 3.2 อัลเทอร์เนเตอร์บนโปรแกรม Matlab/Simulink

- วงจรเรียงกระแสแบบไดโอดเต็มบริดจ์ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟสของอัลเทอร์เนเตอร์เชื่อมต่อผ่านวงจรเรียงกระแสแบบไดโอดเต็มบริดจ์ เพื่อแปลงไฟกระแสสลับให้เป็นกระแสตรง การจำลองวงจรเรียงกระแสแบบไดโอดเต็มบริจด์ แสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ไดโอดเต็มบริจด์เรียงกระแสของระบบอัลเทอร์เนเตอร์บนโปรแกรม Matlab/Simulink

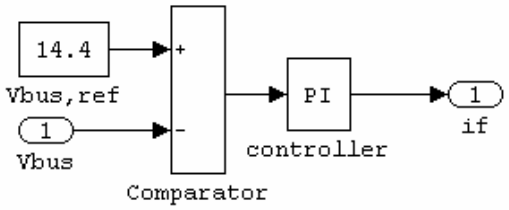
- ภาระและแบตเตอรี่ แบบจำลองภาระและแบตเตอรี่สามารถจำลองด้วยความต้านทานสมมูล ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามสถานะการเปิด-ปิดของภาระในระบบกำลังไฟฟ้ารถยนต์ และแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรงต่ออนุกรมกับความต้านทานภายในแบตเตอรี่ ดังแสดงในรูปที่ 3.4



(ก) ภาระ (ข) แบตเตอรี่

รูปที่ 3.4 ภาระและแบตเตอรี่ของระบบอัลเทอร์เนเตอร์บนโปรแกรม Matlab/Simulink

- โวลต์เตจเร็กกูเลเตอร์ ทำหน้าที่ควบคุมแรงดันบัสไฟฟ้าโดยการเปรียบเทียบกับค่าแรงดันบัสไฟฟ้าอ้างอิง ($V_{bus,ref}$) ที่ 14.4 โวลต์ เพื่อควบคุมความเข้มสนามแม่เหล็กของขดลวดสนามโรเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.5

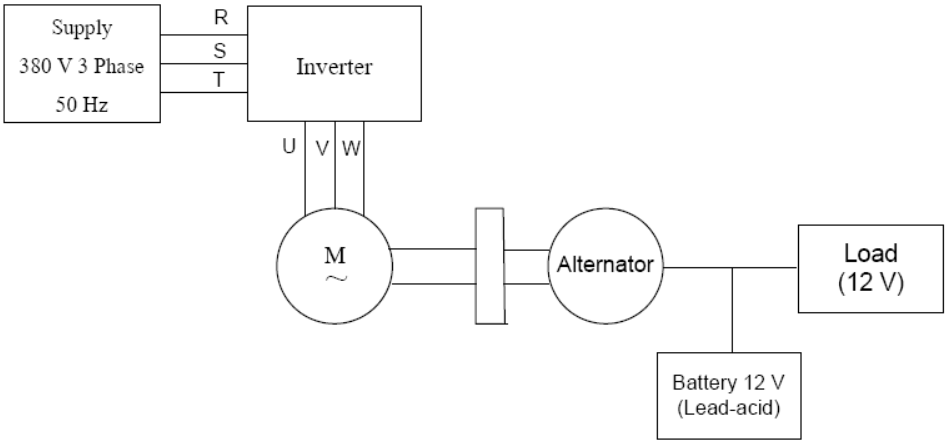


รูปที่ 3.5 โวลต์เตจเร็กกูเลเตอร์ของระบบอัลเทอร์เนเตอร์บนโปรแกรม Matlab/Simulink

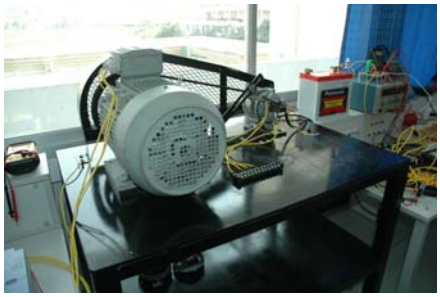
3.2 การติดตั้งเครื่องมือวัดต่างๆ เพื่อทดสอบการทำงานของอัลเทอร์เนเตอร์

การติดตั้งระบบเครื่องมือวัดสำหรับตรวจสอบคุณลักษณะของระบบอัลเทอร์เนเตอร์-โวลต์เตจเร็กกูเลเตอร์เพื่อจำลองการทำงานของระบบอัลเทอร์เนเตอร์-โวลต์เตจเร็กกูเลเตอร์ในรถยนต์ เนื่องจากการทดสอบไม่สะดวกที่จะไปเก็บข้อมูลของระบบกำลังไฟฟ้าจริงได้ จึงได้จำลองการขับอัลเทอร์เนเตอร์โดยใช้มอเตอร์เป็นตัวต้นกำลังสำหรับขับอัลเทอร์เนเตอร์ที่ความเร็วรอบต่างๆ และควบคุมความเร็วด้วยอินเวอร์เตอร์ และเฟืองทดที่เหมาะสม ดังแสดงในรูปที่ 3.6 ชุดทดลองของระบบอัลเทอร์เนเตอร์-โวลต์เตจเร็กกูเลเตอร์ได้ติดตั้งบนโต๊ะเหล็กที่มีความแข็งแรง

สามารถรองรับน้ำหนักของอัลเทอร์เนเตอร์ มอเตอร์และอุปกรณ์อื่นๆ ที่เกี่ยวข้องได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.6 แผนภาพของส่วนประกอบระบบกำลังไฟฟ้ารถยนต์ที่ใช้ทดสอบ



รูปที่ 3.7 ระบบทดสอบอัลเทอร์เนเตอร์-โวลต์เตจเร็กกูเลเตอร์

<u>อุปกรณ์และรายละเอียดชุดทดลองนี้ประกอบไปด้วย</u>

1. โต๊ะเหล็กสำหรับวางอุปกรณ์ มีขนาด กว้าง x ยาว x สูง ประมาณ 0.8 x 1.0 x 0.8 เมตร โต๊ะเหล็กประกอบขึ้นจากเหล็กแผ่นที่มีขนาดความหนา 5 มิลลิเมตร ซึ่งมี 2 ชั้น ชั้นบนเป็นที่ยึดมอเตอร์เหนี่ยวนำกับตัวอัลเทอร์เนเตอร์ ส่วนชั้นล่างจะเป็นที่วางเครื่องมือวัดที่ใช้ทดสอบการขับอัลเทอร์เนเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ได้ใช้สายพานเป็นตัวเชื่อมต่อมายังอัลเทอร์เนเตอร์ การทดรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ทำได้โดยใช้ขนาดมู่เล่ที่มอเตอร์เหนี่ยวนำให้มีขนาดใหญ่กว่ามู่เล่ของอัลเทอร์เนเตอร์ 3.5 เท่า เพื่อให้อัลเทอร์เนเตอร์มีความเร็วรอบสูงขึ้น บนโต๊ะเหล็กจะมีตะแกรงเหล็กสำหรับครอบมู่เล่ของมอเตอร์เหนี่ยวนำกับอัลเทอร์เนเตอร์เพื่อป้องกันอันตรายขณะที่ทดลองการทำงานของอัลเทอร์เนเตอร์-โวลต์เตจเร็กกูเลเตอร์ ฝาครอบและฐานของมอเตอร์

เหนี่ยวนำและอัลเทอร์เนเตอร์เชื่อมต่ออยู่บนโต๊ะเหล็ก ลักษณะเช่นนี้ทำให้โต๊ะเหล็กที่ใช้ทำการทดสอบถือว่าเป็นขั้วลบ เพื่อลดสัญญาณรบกวน (noise) ต้องต่อกราวด์เข้ากับโต๊ะเหล็ก

2. มอเตอร์ไฟฟ้าที่เลือกใช้เป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำ (Induction Motor) 3 เฟส ขนาดกำลังไฟฟ้า 7.5 แรงม้า 380 โวลต์ ความเร็วรอบพิกัด 1,440 รอบ/นาที ความถี่ 50 Hz ต่อกันในลักษณะแบบเดลต้า ทำหน้าที่เป็นตัวต้นกำลังสำหรับขับอัลเทอร์เนเตอร์ ตัวโครงของมอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นกราวด์ ดังที่แสดงในรูป 3.8

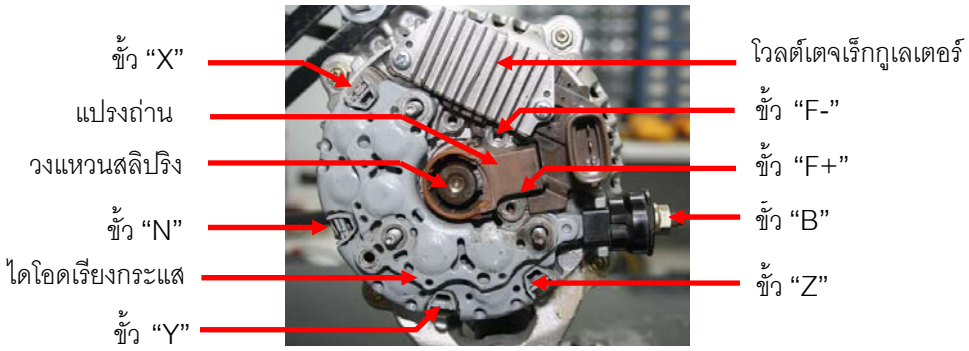
รูปที่ 3.8 มอเตอร์เหนี่ยวนำเหนี่ยวนำสำหรับใช้ขับอัลเทอร์เนเตอร์

3. อินเวอร์เตอร์ ขนาด 7.5 กิโลวัตต์ แรงดัน 3 เฟส 380 – 460 โวลต์ 50/60 Hz ทำหน้าที่เป็นตัวปรับความถี่ทางไฟฟ้าเพื่อควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ดังที่แสดงในรูป 3.9 โดยตั้งค่าความถี่พื้นฐาน (Base frequency setting) ไว้ที่ 50 Hz และสามารถปรับเปลี่ยนค่าความถี่สูงจนถึง 400 Hz เมื่อต้องการทดสอบที่ความเร็วรอบอัลเทอร์เนเตอร์สูงๆ

รูปที่ 3.9 อินเวอร์เตอร์

4. อัลเทอร์เนเตอร์แบบลันเดลล์ มีขนาด 50 แอมแปร์ 12 โวลต์ เป็นชนิดที่ใช้สำหรับรถยนต์ที่มีระบบไฟฟ้าให้ตัวถังรถเป็นขั้วลบ (กราวด์) ดังที่แสดงในรูป 3.10

รูปที่ 3.10 อัลเทอร์เนเตอร์ ขนาด 50 แอมป์ 12 โวลต์ ที่ใช้ทดสอบ



รูปที่ 3.11 ส่วนประกอบและขั้วต่างๆ ของอัลเทอร์เนเตอร์รถยนต์

- ขั้ว “B” เป็นสายเอาต์พุตของอัลเทอร์เนเตอร์ที่เชื่อมต่อกับขั้วบวกของแบตเตอรี่ และโครงของอัลเทอร์เนเตอร์เป็นกราวด์เชื่อมต่อขั้วลบของแบตเตอรี่
- วงแหวนสลิปริง (Slip ring) ทำหน้าที่เป็นตัวรับกระแสไฟจากแบตเตอรี่ผ่านเข้าไปในขดลวดโรเตอร์ เพื่อสร้างสนามแม่เหล็ก
- แปรงถ่าน (brushes) ซึ่งเป็นตัวรับกระแสไฟจากแบตเตอรี่เพื่อส่งผ่านไปยังวงแหวนสลิปริง
- ชุดแปลงไฟ (Bridge diode rectifier) ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนกระแสไฟสลับให้เป็นกระแสตรง
- ขั้ว “F+” เป็นขั้วบวกขดลวดโรเตอร์ของอัลเทอร์เนเตอร์
- ขั้ว “F-” เป็นขั้วลบขดลวดโรเตอร์ของอัลเทอร์เนเตอร์ซึ่งเชื่อมต่ออยู่กับโครงของอัลเทอร์เนเตอร์
- ขั้ว “X” ปลายขั้วต่อของขดลวดสเตเตอร์เฟส 1
- ขั้ว “Y” ปลายขั้วต่อของขดลวดสเตเตอร์เฟส 2
- ขั้ว “Z” ปลายขั้วต่อของขดลวดสเตเตอร์เฟส 3
- ขดลวดทั้ง 3 เฟส เมื่อนำไปประกอบลงในแกนเหล็กอ่อน โครงสร้างของสเตเตอร์จะวางทำมุมกัน 120 องศา และปลายของขดลวดทั้ง 3 นี้ ด้านหนึ่งจะต่อร่วมกัน จุดนี้เรียกว่าจุดต่อร่วม

(Neutral junction) หรือขั้ว “N” ของอัลเทอร์เนเตอร์ การต่อขดลวดแบบนี้เรียกว่า การต่อแบบรูปตัววาย (Y) อยู่ภายในอัลเทอร์เนเตอร์ โดยมีเฟสตามลำดับที่แสดงในรูปที่ 3.11

5. แบตเตอรี่รถยนต์ชนิดกรดตะกั่วแบบไม่ต้องเติมน้ำกลั่นบ่อย (Maintenance-Free) ขนาดความจุเฉลี่ย 45 แอมป์-ชั่วโมง ขนาดแรงดัน 12 โวลต์ ทำหน้าที่เก็บพลังงานไฟฟ้าและจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับภาระทางไฟฟ้า ดังที่แสดงในรูป 3.12

รูปที่ 3.12 แบตเตอรี่รถยนต์ชนิดกรดตะกั่วแบบไม่ต้องเติมน้ำกลั่นบ่อย

6. ภาระทางไฟฟ้า เป็นหลอดไฟที่ใช้สำหรับรถยนต์ แต่ละหลอดมีขนาด 100 วัตต์ ที่ระดับแรงดันไฟฟ้ารถยนต์ จำนวน 10 หลอด และความต้านทานแบบกระเบื้องที่ค่าต่างๆ สำหรับปรับกำลังไฟฟ้าแบบละเอียด ดังที่แสดงในรูป 3.13

(ก) หลอดไฟรถยนต์

(ข) ความต้านทานแบบกระเบื้อง

รูปที่ 3.13 ภาระทางไฟฟ้าของระบบอัลเทอร์เนเตอร์-โวลต์เตจเร็กกูเลเตอร์

7. เครื่องมือวัดและอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณต่างๆ ในระบบไฟฟ้ารถยนต์ เช่น

- เครื่องมือวัดกระแสตรง (DC Amp meter) ขนาด 30 แอมป์ และมัลติมิเตอร์ (Multimeter) ใช้วัดแรงดันไฟฟ้า ดังที่แสดงในรูป 3.14 (ก)

- เครื่องบันทึกสัญญาณแบบดิจิตอล (Digital Storage Oscilloscope) 100 MHz 1 GS/s 12 Bits แต่ช่องสัญญาณจะแยกออกจากกัน (Isolated channel) ดังที่แสดงในรูป 3.14 (ข)
- มาตรวัดความเร็วแบบพกพา (Pocket Tachometer) สำหรับวัดความเร็วรอบอัลเทอร์เนเตอร์ มีช่วงการวัดที่ 60-20,000 rpm ดังที่แสดงในรูป 3.14 (ค)
- เครื่องมือวัดหยั่งกระแส (Current probe) วัดกระแสตรงและกระแสสลับรูปคลื่นสัญญาณไซน์ที่ความถี่น้อยกว่าหรือเท่ากับ 65 Hz มีอัตราส่วนอินพุตต่อเอาต์พุต 10 mV/A ที่ช่วง 40 แอมป์ กับ 1 mV/A ที่ช่วง 400 แอมป์ ดังที่แสดงในรูป 3.14 (ง)
- ตัววัดกระแสเข้าแบตเตอรี่ (Current sensor) วัดกระแสตรงตรงและกระแสสลับได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.14 (จ) โดยมีอัตราส่วนจำนวนรอบขดลวดเท่ากับ 1: 2000 วัดค่ากระแสปกติอยู่ 200 แอมป์ ในวงจรตัววัดกระแสเข้าแบตเตอรี่ใช้แหล่งจ่ายไฟ ± 15 โวลต์ และได้ต่อความต้านทานสำหรับวัดกระแสเข้า-ออก 100 โอห์ม เมื่อคิดคำนวณกระแสที่วัดได้จะเป็นไปตามสมการ (3.1)

$$I_{Bat} = \frac{\pm\left(V_{hall,output}\right)\times 2000}{100} \qquad (3.1)$$

โดยที่

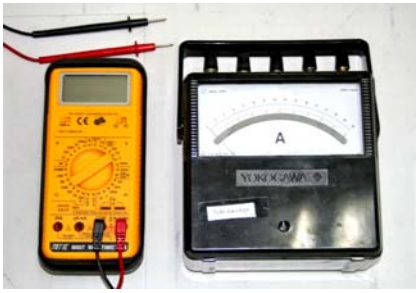
I_{Bat} เป็นกระแสจริงที่ไหลเข้า-ออกจากแบตเตอรี่

$V_{hall,output}$ เป็นแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากส่วนเอาต์พุตของตัววัดกระแส

- แหล่งจ่ายไฟตรง (DC Power Supply) ขนาด 0- 30 โวลต์ 2 แอมป์ ดังแสดงในรูปที่ 3.14 (ฉ)
- สายไฟที่เลือกใช้ในการทดสอบเป็นแบ่งออกเป็น 2 ชนิด

1. สายที่เชื่อมต่อจากขั้ว “B” ของอัลเทอร์เนเตอร์ไปยังขั้วบวกแบตเตอรี่ หรือที่เรียกว่า $R_{Wire}+$ และสายที่เชื่อมต่อจากโครงอัลเทอร์เนเตอร์ไปขั้วลบของแบตเตอรี่ หรือที่เรียกว่า R_{wire} - ที่อยู่ในแบบจำลอง ซึ่งเป็นสายชนิดที่ใช้ในรถยนต์แบบ HEB ขนาดสาย 20 ตารางมิลลิเมตร การวัดค่าความต้านของสาย R_{wire} + และ R_{wire} - โดยการป้อนไฟฟ้ากระแสตรงจากนั้นวัดค่ากระแสที่ไหลผ่านสายและแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม จะได้ค่าความต้านทาน 0.1 โอห์ม

2. สายที่เชื่อมต่อจากขั้วแบตเตอรี่ไปยังภาระ ชนิดสายที่เลือกใช้เป็นแบบ THW คือมีลักษณะสายกลมแกนเดียวหุ้มด้วยฉนวน พี.วี.ซี. แรงดัน 750 โวลต์ อุณหภูมิ 70 องศา ขนาดสาย 4 ตารางมิลลิเมตร ทนขนาดกระแสสูงสุดได้ 31 แอมป์ ทดแทน ขนาดสาย 2.5 ตารางมิลลิเมตร ซึ่งทนกระแสได้เพียง 21 แอมป์ ในกรณีที่ต้องการทดสอบภาระ 300 วัตต์ขึ้นไป และพิจารณาเลือกใช้ สายไฟ สายเคเบิล ขั้วต่อต่างๆ ให้เหมาะสมกับขนาดกระแสที่ไหลผ่าน

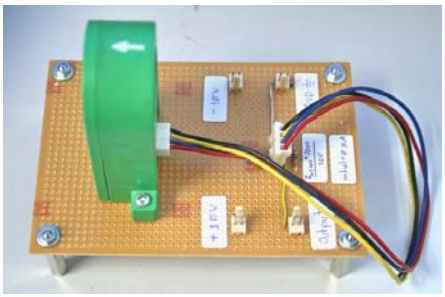


(ก) เครื่องมือวัดกระแสและแรงดันไฟฟ้า

(ข) เครื่องบันทึกสัญญาณ

(ค) มาตรวัดความเร็ว

(ง) เครื่องมือวัดหยั่งกระแส



(จ) ตัววัดกระแสเข้าแบตเตอรี่

(ฉ) แหล่งจ่ายกำลัง

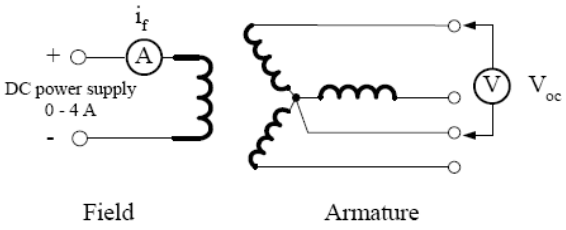
รูปที่ 3.14 เครื่องมือวัดและอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณต่างๆ ในระบบไฟฟ้า

3.3 การทดสอบคุณลักษณะของอัลเทอร์เนเตอร์แบบลันเดลล์

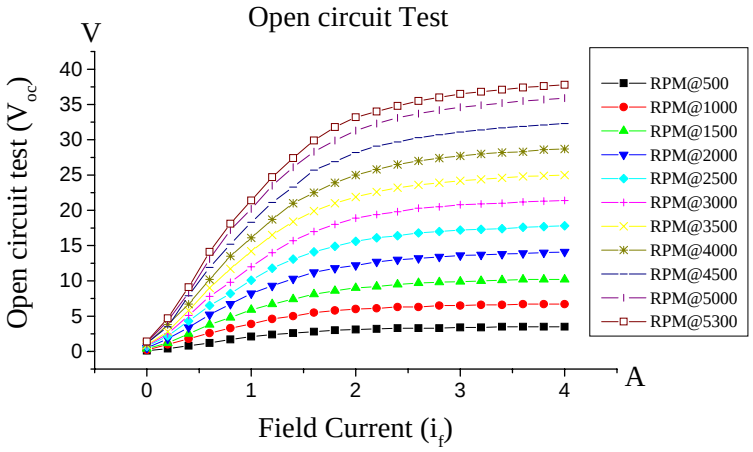
การทดสอบอัลเทอร์เนเตอร์แบบลันเดลล์ แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การทดสอบโดยการเปิดวงจร (Open circuit test) และการลัดวงจร (Short circuit test) โดยที่อัลเทอร์เนเตอร์แบบลันเดลล์ ที่ใช้ทดสอบมีขนาด 50 แอมป์ 12 โวลต์

การทดสอบโดยการเปิดวงจร เป็นการทดสอบเพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสฟิลด์กับแรงดันปลายของอัลเทอร์เนเตอร์ขณะเปิดวงจร (Open circuit voltage: V_{oc}) หรือเส้นโค้ง Magnetization ที่ความเร็วรอบต่างๆ โดยการปรับค่าของกระแสฟิลด์ ที่ค่าต่างๆ กันจากน้อยไปหา

มาก ระหว่าง 0 – 4 แอมป์และบันทึกค่าที่ได้ในแต่ละความเร็วรอบอัลเทอร์เนเตอร์ สำหรับการทดสอบอัลเทอร์เนเตอร์โดยการเปิดวงจร จะมีมอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นตัวขับอัลเทอร์เนเตอร์และใช้แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงป้อนไปยังขดลวดโรเตอร์ โดยที่ไม่มีวงจรไดโอดเต็มบริจด์เรียงกระแสและโวลต์เตจเร็กกูเลเตอร์ประกบติดอยู่บนตัวถังอัลเทอร์เนเตอร์ ซึ่งสามารถเขียนแผนภาพวงจรที่ใช้ทดสอบขณะเปิดวงจร วัดแรงดัน เทียบเฟสกับนิวทรัล ดังแสดงในรูปที่ 3.15

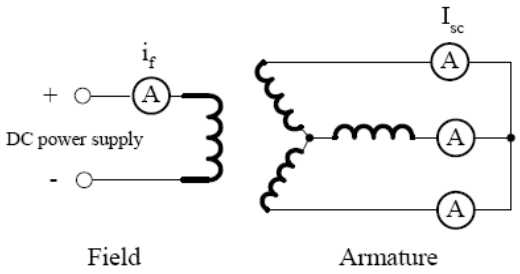


รูปที่ 3.15 แผนภาพวงจรที่ใช้ทดสอบขณะเปิดวงจร

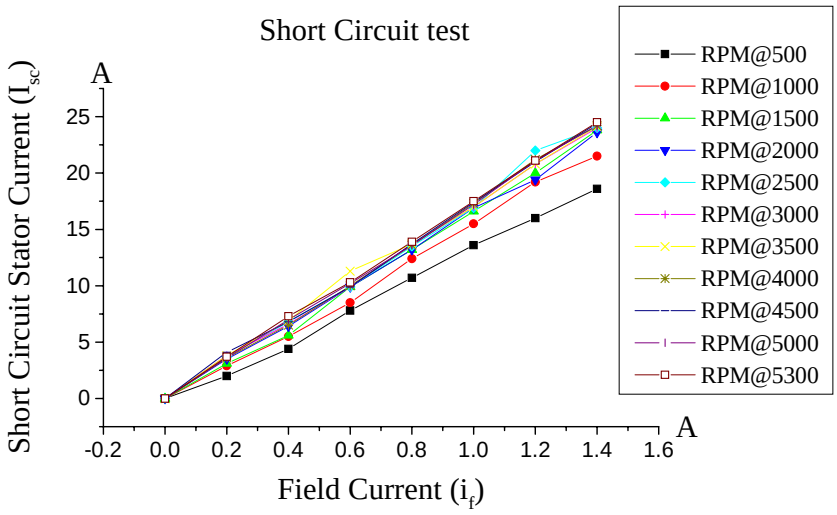


รูปที่ 3.16 ความสัมพันธ์กระแสฟิลด์ กับแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรของอัลเทอร์เนเตอร์แบบลันเดลล์ที่ความเร็วรอบอัลเทอร์เนเตอร์ค่าต่างๆ

การทดสอบโดยการลัดวงจร เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความเหนี่ยวนำซิงโครนัส (Synchronous inductance: L_s) โดยการลัดวงจรขั้วปลายของอัลเทอร์เนเตอร์ที่ความเร็วรอบต่างๆ และค่อยๆ ปรับค่าของกระแสฟิลด์ เพิ่มขึ้นตามลำดับพร้อมทั้งบันทึกค่าของกระแสขณะลัดวงจร (short circuit current: I_{sc}) ของเครื่องอัลเทอร์เนเตอร์นั้น การทดสอบอัลเทอร์เนเตอร์โดยการเปิดวงจร จะมีมอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นตัวขับอัลเทอร์เนเตอร์และใช้แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงป้อนไปยังขดลวดโรเตอร์ โดยที่ไม่มีไดโอดเต็มบริจด์เรียงกระแสและโวลต์เตจเร็กกูเลเตอร์ประกบติดอยู่บนตัวถุงอัลเทอร์เนเตอร์ ซึ่งสามารถเขียนแผนภาพวงจรที่ใช้ทดสอบขณะลัดวงจร วัดกระแสในแต่ละเฟส ดังแสดงในรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 แผนภาพวงจรที่ใช้ทดสอบขณะลัดวงจร



รูปที่ 3.18 ความสัมพันธ์กระแสฟิลด์กับกระแสขณะลัดวงจรของอัลเทอร์เนเตอร์แบบลันเดลล์ที่ความเร็วรอบอัลเทอร์เนเตอร์ค่าต่างๆ

ลักษณะความสัมพันธ์กระแสฟิลด์ กับแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร ดังแสดงในรูปที่ 3.16 แบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงที่กระแสฟิลด์ กับแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นซึ่งมีค่ากระแสฟิลด์ อยู่ระหว่าง 0-1.4 แอมป์ กับช่วงที่ไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งมีค่ากระแสฟิลด์ อยู่ระหว่าง 1.4 – 4 แอมป์ ส่วนลักษณะความสัมพันธ์กระแสฟิลด์ กับกระแสขณะลัดวงจร ดังแสดงในรูปที่ 3.18 มีความเป็นเชิงเส้นและเกือบจะทับซ้อนกัน

จากผลการทดสอบการเปิดวงจรและลัดวงจร สามารถหาค่าอิมพีแดนซ์ซิงโครนัส (Synchronous impedance: Z_s) ของอัลเทอร์เนเตอร์โดยใช้ค่า V_{oc} และ I_{sc} ที่กระแสฟิลด์ค่าเดียวกัน ดังนี้

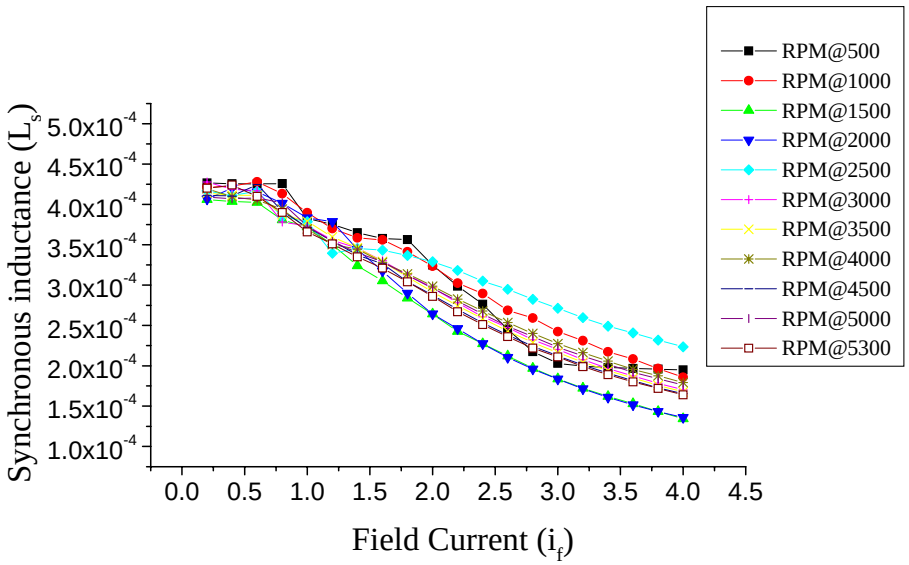
$$Z_s = \sqrt{R_s^2 + X_s^2} = \frac{V_{oc}}{I_{sc}} \qquad (3.2)$$

เมื่อ R_s คือ ความต้านทานบนขดลวดสเตเตอร์

การวัดค่าความต้านทานบนขดลวดสเตเตอร์โดยตรงด้วยการป้อนกระแสตรงให้กับขดลวดสเตเตอร์ จากนั้นวัดค่ากระแสที่ไหลผ่านขดลวดสเตเตอร์และแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม จะได้ค่าความต้านทาน 58 $m\Omega$ แทนค่าความต้านทานบนขดลวดสเตเตอร์ลงในสมการที่ (3.2) จากนั้นจัดสมการใหม่ เพื่อหาค่าความเหนี่ยวนำซิงโครนัส จะได้ดังสมการที่ (3.3)

$$L_s = \frac{\sqrt{\left(\frac{V_{oc}}{I_{sc}}\right)^2 - (0.058)^2}}{\omega} \tag{3.3}$$

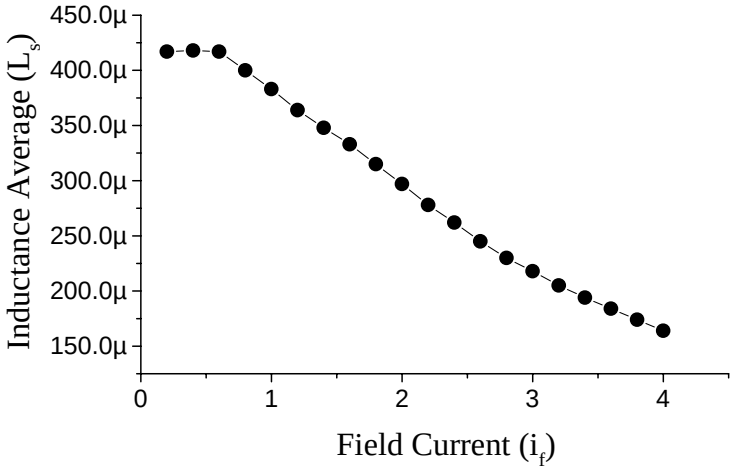
เนื่องจากการทดสอบแบบลัดวงจรอัลเทอร์เนเตอร์ มีข้อจำกัดทางด้านพิกัดไฟฟ้าสามารถทดสอบได้เฉพาะช่วงกระแสฟิลด์ 0-1.4 แอมป์ เพื่อให้ได้ค่าความเหนี่ยวนำที่อยู่ในช่วงกระแสฟิลด์ 0-4 แอมป์ ซึ่งเป็นย่านการใช้งานของระบบไฟฟ้ารถยนต์ จึงใช้วิธีการประมาณค่านอกช่วงการทดสอบของข้อมูลที่มีอยู่ (Extrapolation) เพื่อหาความสัมพันธ์ของซิงโครนัสรีแอกแตนซ์กับกระแสฟิลด์และความเร็วรอบอัลเทอร์เนเตอร์ ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 ความสัมพันธ์ความเหนี่ยวนำซิงโครนัสกับกระแสฟิลด์

เมื่อพิจารณาระบบอัลเทอร์เนเตอร์แบบลันเดลล์ ที่ใช้ในรถยนต์แล้ว จะพบว่าค่ากระแสฟิลด์ ที่ใช้นั้นครอบคลุมทั้งช่วงที่ไม่เกิดการอิ่มตัวทางแม่เหล็กและช่วงที่เกิดการอิ่มตัวทางแม่เหล็ก ซึ่งเป็นผลให้ตัวแปรค่าความเหนี่ยวนำซิงโครนัสที่เลือกใช้แบบค่าคงที่ไม่ถูกต้องนัก ดังนั้น ความเหนี่ยวนำซิงโครนัสต้องเปลี่ยนค่าตามความเร็วรอบของอัลเทอร์เนเตอร์และกระแส

ฟิลด์ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบของอัลเทอร์เนเตอร์มีผลต่อค่าความเหนี่ยวนำซิงโครนัสน้อยว่าการเปลี่ยนแปลงกระแสฟิลด์ เพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณา จึงได้สร้างตัวแทนของกลุ่มข้อมูลโดยการหาเฉลี่ยเพื่อนำไปใช้งาน ดังแสดงในรูปที่ 3.20 ซึ่งพบว่า ความเหนี่ยวนำซิงโครนัสมีค่าแปรผกผันกับกระแสฟิลด์ในช่วงการใช้งานของอัลเทอร์เนเตอร์ และเหมาะสมที่จะนำไปใช้แทนในแบบจำลองอัลเทอร์เนเตอร์เพื่อหาค่ากำลังไฟฟ้าต่อไป



รูปที่ 3.20 ความสัมพันธ์ความเหนี่ยวนำซิงโครนัสเฉลี่ยกับกระแสฟิลด์

ส่วนการหาค่าความเหนี่ยวนำของฟิลด์คอยล์ (Field coil) ในทางปฏิบัติจะใช้วิธีคำนวณจากพื้นที่ใต้กราฟรูปคลื่นแรงดันและกระแสของขดลวดโรเตอร์ ดังสมการที่ (3.4)

$$\frac{V_{field} \cdot t_{on}}{\Delta i_{field}} = L_{field} \tag{3.4}$$

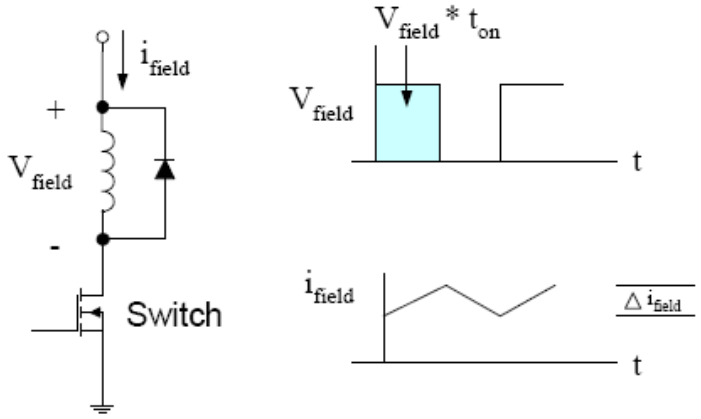
โดยที่ t_{on} คือ ช่วงเวลาที่สวิตช์ปิด (close)

V_{field} คือ แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำของฟิลด์คอยล์

i_{field} คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของฟิลด์คอยล์

ความเหนี่ยวซิงโครนัสเฉลี่ยในทางปฏิบัติเกิดจากการวัดสัญญาณขนาดใหญ่ (Large signal measurement) ที่ได้จากรูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำของฟิลด์คอยล์และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของฟิลด์คอยล์ ดังแสดงในรูปที่ 3.21 ซึ่งเหมือนกับวิธีการหาความเหนี่ยวนำซิงโครนัสเฉลี่ยโดยอาศัยผลทดสอบคุณลักษณะการเปิดวงจรและลัดวงจร

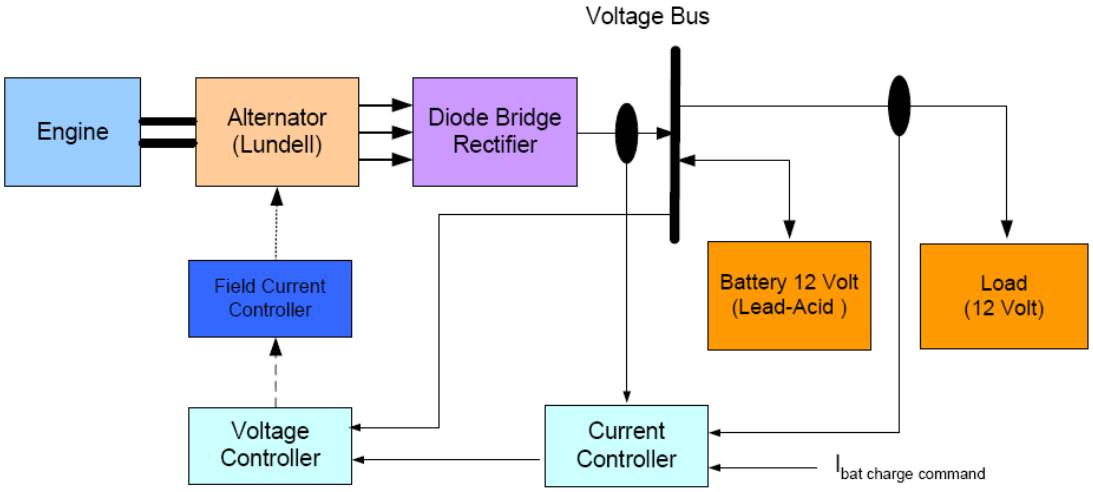
ของอัลเทอร์เนเตอร์แบบที่นำเสนอ เมื่อการเปลี่ยนแปลงของค่ากระแสฟิลด์ที่เกี่ยวข้องกับค่าคงตัวเวลา (time constant) ของขดลวดโรเตอร์ $\frac{L_{field}}{R_{field}}$ มีค่าเท่ากับหรือมากกว่า 10 มิลลิวินาที [7]



รูปที่ 3.21 วงจรสวิตช์ความเหนี่ยวนำ

3.4 การพัฒนาระบบกำลังไฟฟ้าอัลเทอร์เนเตอร์

ระบบกำลังไฟฟ้าอัลเทอร์เนเตอร์ที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ จะมี 2 ส่วน คือ วงจรควบคุมแรงดันบัสไฟฟ้ากับวงจรควบคุมกระแสอัลเทอร์เนเตอร์ โดยที่ระบบยังคงมีอัลเทอร์เนเตอร์ทำหน้าที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส และวงจรเรียงกระแสเต็มบริจด์ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสเป็นไฟฟ้ากระแสตรง วงจรควบคุมแรงดันบัสไฟฟ้าทำหน้าที่รักษาระดับแรงดันที่บัสกำลัง (Power Bus) ซึ่งก็คือแรงดันเอาต์พุตของอัลเทอร์เนเตอร์ให้ไม่เกินค่าพิกัดที่กำหนด ส่วนวงจรควบคุมกระแสอัลเทอร์เนเตอร์ ทำหน้าที่เปิด-ปิดสวิตช์ตามความต้องการของภาระพร้อมทั้งประจุไฟเข้าแบตเตอรี่ การควบคุมทั้ง 2 ส่วน มีผลโดยตรงกับกระแสฟิลด์ที่ป้อนให้กับขดลวดโรเตอร์ที่นำไปสร้างสนามแม่เหล็กและเหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าในอัลเทอร์เนเตอร์เพื่อผลิตกำลังไฟฟ้าจ่ายให้กับภาระและประจุไฟให้แบตเตอรี่ต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 3.22 ส่วนที่เกี่ยวข้องกับการจัดการด้านพลังงานโดยตรง คือ การตั้งค่ากระแสไหลเข้าแบตเตอรี่เพื่อประจุไฟให้กับแบตเตอรี่ ($I_{bat\ charge\ command}$) และการตรวจรับค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าของภาระ เพื่อนำไปเป็นค่าตั้งต้นการผลิตของอัลเทอร์เนเตอร์ ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปตามสภาวะความต้องการของภาระอย่างแท้จริง



รูปที่ 3.22 แผนภาพการพัฒนาระบบกำลังไฟฟ้าอัลเทอร์เนเตอร์

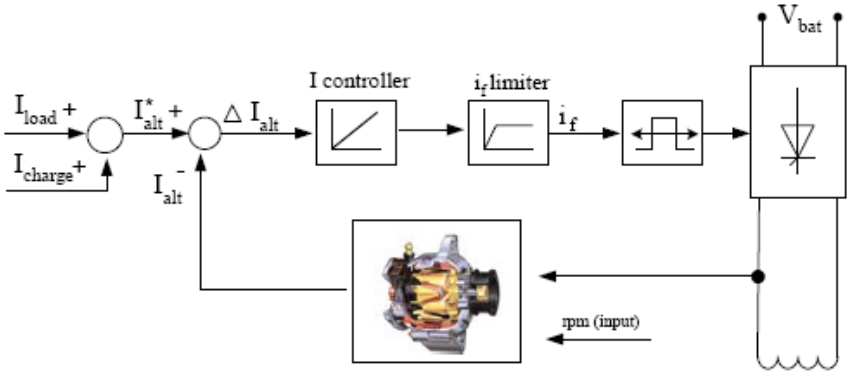
3.5 การออกแบบวงจรควบคุมแรงดันและกระแสไฟฟ้าของอัลเทอร์เนเตอร์

(Voltage and Current Alternator Controller: VCC)

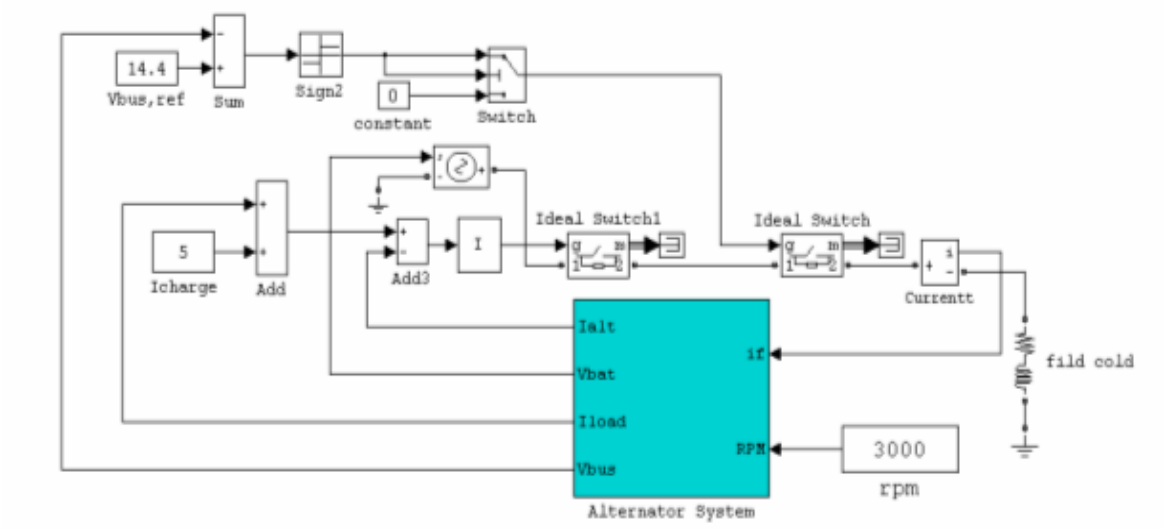
วงจร VCC เป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ที่ออกแบบมาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพโดยการลดกำลังสูญเสีย ที่เกิดจากแรงดันตกคร่อมตัวอุปกรณ์ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในวงจรจะทำหน้าที่เหมือนกับสวิตช์ที่เปิด-ปิดด้วยความถี่สูงมากเมื่อมีการแปรผันของภาระทางไฟฟ้า ช่วงเวลาการทำงานของอุปกรณ์สวิตช์ ก็จะถูกปรับให้มีค่าเหมาะสม จึงสามารถลดการสูญเสียในขณะที่อุปกรณ์ไม่ทำงานได้

ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว การสูญเสียกำลังสามารถเกิดขึ้นทั้งในตัวกำเนิดกำลังไฟฟ้าและวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ควบคุม หลังจากทดแทนระบบอัลเทอร์เนเตอร์-โวลต์เตจเร็กกูเลเตอร์แบบเดิมด้วยระบบอัลเทอร์เนเตอร์แบบใหม่ที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้นแล้ว ถ้าต้องการปรับปรุงประสิทธิภาพในการใช้งานสูงสุดก็จำเป็นต้องพิจารณาถึงกฎในการควบคุมระบบอัลเทอร์เนเตอร์ ระบบอัลเทอร์เนเตอร์ควรจะผลิตกำลังไฟฟ้าให้เหมาะสมกับภาระหรือความต้องการทางไฟฟ้า เพราะว่าถ้าผลิตมากเกินไป โดยไม่มีใช้ประโยชน์ ก็จะเป็นการสูญเปล่า แต่ถ้าผลิตน้อยเกินไประบบก็จะขาดเสถียรภาพ ในรูปที่ 3.23 เป็นแผนผังการควบคุมของวงจรควบคุมแรงดันและกระแสไฟฟ้าของอัลเทอร์เนเตอร์ที่ซึ่งบรรลุผลได้ของระบบอัลเทอร์เนเตอร์แบบใหม่ที่นำเสนอ โดยกำหนดให้กระแสขดลวดสนามแม่เหล็กและช่วงเวลาในการทำงานสวิตช์ เป็นฟังก์ชันของกระแสภาระและความเร็วรอบของเครื่องยนต์ แบบจำลองการทำงานของวงจรควบคุมแรงดันและ

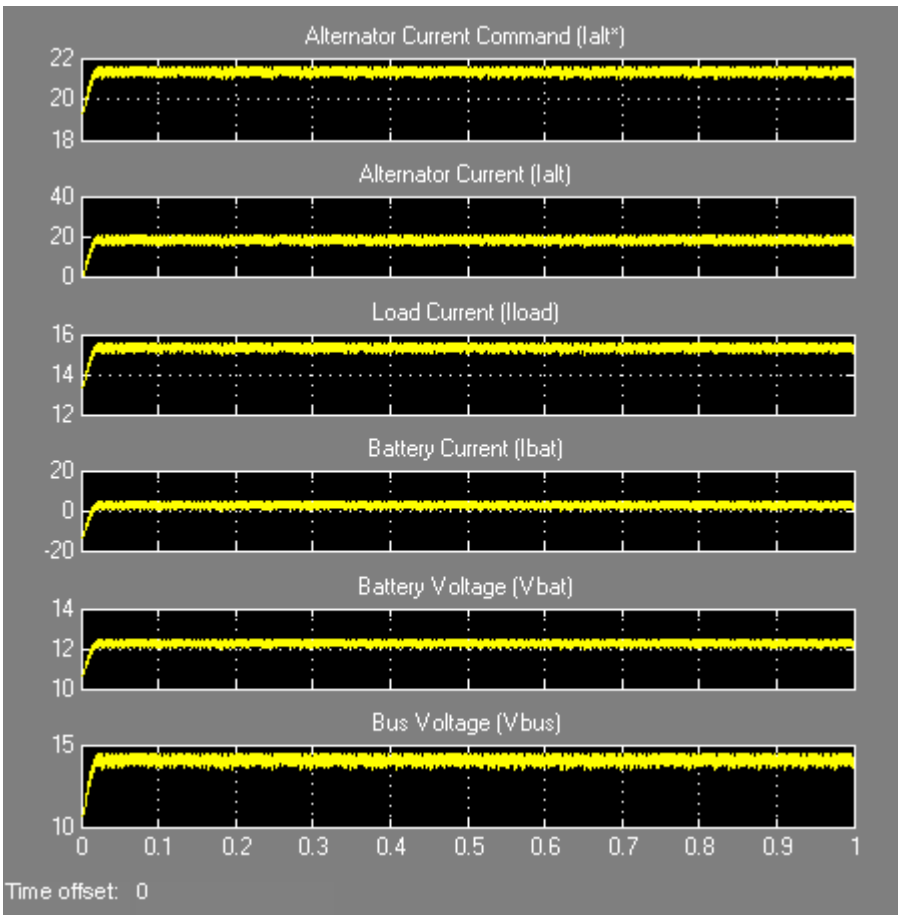
กระแสไฟฟ้าของอัลเทอร์เนเตอร์เพื่อควบคุมกำลังไฟฟ้าบนโปรแกรม Matlab ได้แสดงในรูปที่ 3.24 ส่วนตัวอย่างผลจำลองการทำงานได้แสดงดันรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.23 แผนผังของวงจรควบคุมกระแสไฟฟ้าของอัลเทอร์เนเตอร์



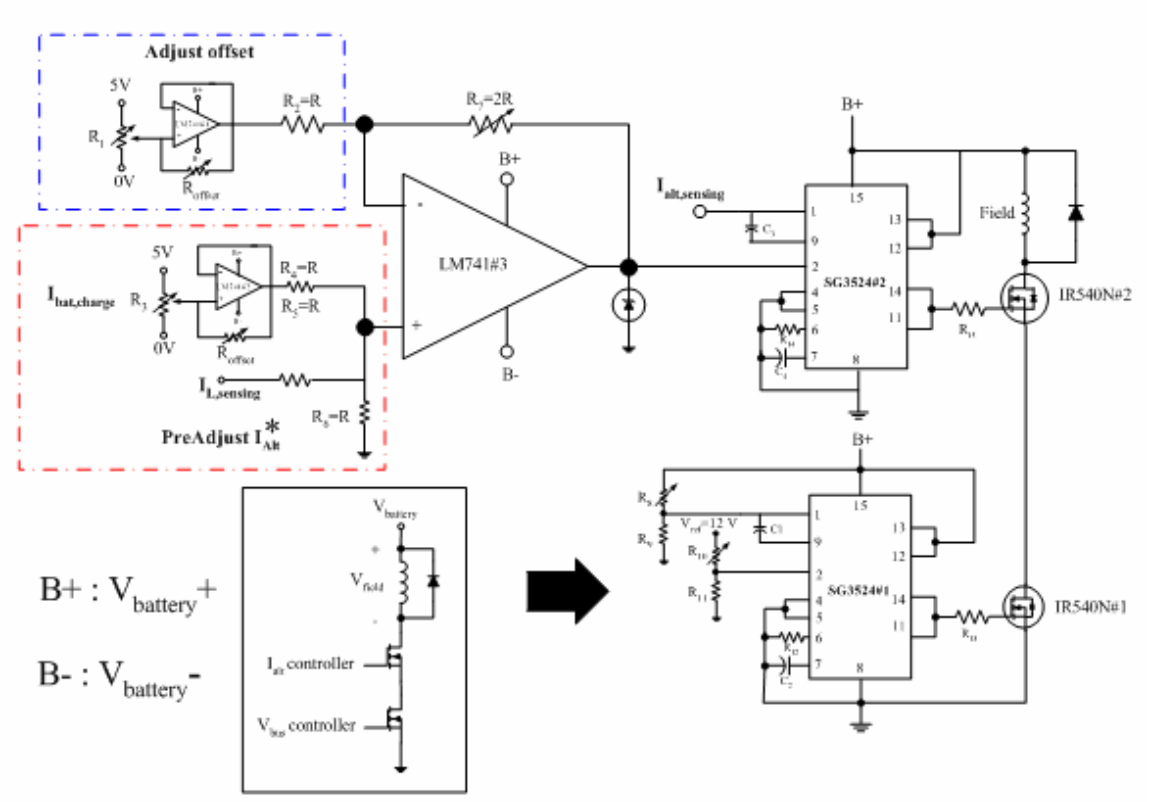
รูปที่ 3.24 ระบบอัลเทอร์เนเตอร์และระบบควบคุมบนโปรแกรม Matlab/Simulink



รูปที่ 3.25 ผลการทำงานวงจรควบคุมแรงดันและกระแสไฟฟ้าของอัลเทอร์เนเตอร์บนโปรแกรม Matlab/Simulink

การออกแบบวงจรควบคุมแรงดันและกระแสไฟฟ้าของอัลเทอร์เนเตอร์ (VCC) ตามแผนผังการทำงานในรูปที่ 3.24 สามารถแบ่งออกเป็น 2 วงจร คือ วงจรควบคุมกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วอัลเทอร์เนเตอร์โดยใช้หลักการของเทคนิคพัลส์วิดท์มอดูเลชั่น (Pulse Width Modulation: PWM) เพื่อควบคุมช่วงเวลานำกระแสของมอสเฟตในวงจรควบคุมกระแสฟิลด์ วงจรควบคุมกระแสอัลเทอร์เนเตอร์อาศัยการวัดกระแสภาระและกระแสอัลเทอร์เนเตอร์โดยตรงด้วยตัวเซนเซอร์กระแส ส่วนวงจรควบคุมแรงดันบัสไฟฟ้าอาศัยหลักการแบ่งแรงดันของความต้านก็จะสามารถทำงานตามที่กำหนดได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.26 วงจร VCC จะควบคุมการไหลของกระแสฟิลด์เข้าขดลวดโรเตอร์ โดยมีหลักการทำงานดังนี้ คือ เมื่อกระแสไฟฟ้าอัลเทอร์เนเตอร์ผลิตออกมามีค่าไม่ถึงระดับที่กำหนด ตามคำสั่งการผลิตกระแสอัลเทอร์เนเตอร์ ก็จะทำการปิดสวิตช์ลงให้กระแสฟิลด์ไหลเข้าไปในขดลวดโรเตอร์เพื่อที่จะไปสร้างสนามแม่เหล็ก ทำให้อัลเทอร์เนเตอร์

ผลิตกระแสไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้น จนถึงระดับกระแสไฟฟ้าอัลเทอร์เนเตอร์ที่ตั้งไว้ และเมื่อกระแสไฟฟ้าอัลเทอร์เนเตอร์เพิ่มขึ้นจนเกินระดับกระแสไฟฟ้าอัลเทอร์เนเตอร์ที่ตั้งไว้ ก็จะทำการเปิดสวิตซ์ขึ้นตัดกระแสฟิลด์ไม่ให้ไหลเข้าไปในขดลวดโรเตอร์ เมื่อไม่มีกระแสฟิลด์ไหลเข้าไปในขดลวดโรเตอร์ก็ไม่มีการสร้างสนามแม่เหล็กขึ้นทำให้ไม่มีการผลิตกระแสไฟฟ้าอัลเทอร์เนเตอร์ออกมา



รูปที่ 3.26 วงจรควบคุมแรงดันและกระแสไฟฟ้า (VCC) ของระบบอัลเทอร์เนเตอร์

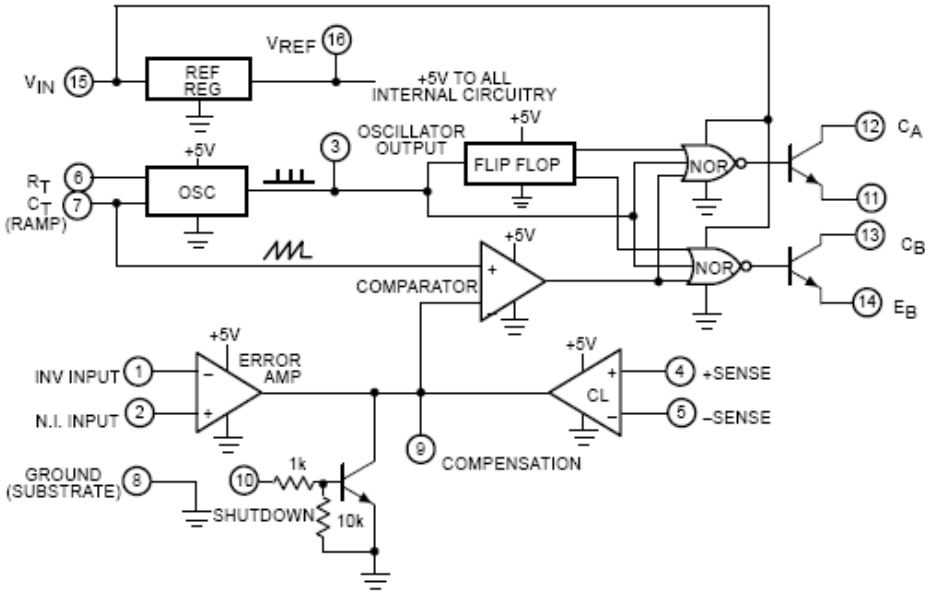
การควบคุมการผลิตกำลังไฟฟ้าอัลเทอร์เนเตอร์ จะใช้ไอซี SG3524N เป็นตัวตั้งค่าของคำสั่งการผลิตกระแสอัลเทอร์เนเตอร์ที่ต้องการ ถ้าอัลเทอร์เนเตอร์ผลิตกระแสไฟฟ้าเกินค่าที่ตั้งไว้ก็จะทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมให้มอสเฟตเปิดสวิตซ์ขึ้นทำให้กระแสฟิลด์ไม่ไหลเข้าขดลวดโรเตอร์ จึงทำให้กระแสไฟฟ้าอัลเทอร์เนเตอร์ลดลง

3.6 อุปกรณ์และหลักการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆ ในวงจรควบคุมแรงดันและกระแสไฟฟ้าของอัลเทอร์เนเตอร์

อุปกรณ์ที่ได้นำมาใช้ในการควบคุมการผลิตกำลังไฟฟ้าของอัลเทอร์เนเตอร์ ประกอบไปด้วยอุปกรณ์หลัก คือ ไอซี SG3524N และมอสเฟตชนิดเอ็นแชนแนล (N channel) ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้จะใช้ในการควบคุมการป้อนกระแสเข้าขดลวดโรเตอร์เพื่อสร้างสนามแม่เหล็ก โดยอาศัยวงจรควบคุมพื้นฐานทางอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งรายละเอียดและหลักการของอุปกรณ์ต่างๆ มีดังต่อไปนี้

3.6.1 หลักการทำงานของไอซี SG3524N

ไอซี SG3524N ทำหน้าที่ควบคุมการเปิด-ปิดสวิตช์ตามสัญญาณที่เข้ามาสั่งให้ไอซีทำงาน ลักษณะไอซีเป็นแบบ16 ขา โดยมีโครงสร้างภายใน ดังแสดงในรูปที่ 3.27



รูปที่ 3.27 โครงสร้างภายในไอซี SG3524N

หลักการทำงานเมื่อมีการป้อนไฟเลี้ยงไอซี และทำการตั้งค่าความถี่ที่เราต้องการแล้ว ส่วนที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมการผลิตกำลังไฟฟ้า คือ วงจรเปรียบเทียบค่ากระแสอัลเทอร์เนเตอร์ ซึ่งจะทำให้ได้ค่าผิดพลาด (Error) ขึ้นมาแล้วจึงนำค่าผิดพลาดไปใช้ในการสร้างสัญญาณในการควบคุมมอสเฟต โดยจะสร้างสัญญาณอ้างอิงซึ่งเป็นคำสั่งการผลิตกระแสอัลเทอร์เนเตอร์ (I^{*}_{alt})

ขึ้นมา เพื่อที่จะนำมาเปรียบเทียบกับสัญญาณที่ถูกป้อนกลับ ($I_{alt,feedback}$) และจะทำการควบคุมการปิด-เปิดของสวิตซ์เพื่อควบคุมการไหลของกระแสฟิลด์

กระแสอัลเทอร์เนเตอร์และกระแสภาระ สามารถวัดได้โดยใช้ ตัวเซนเซอร์กระแส (Current Sensor: ACS754SCB-200) ซึ่งค่าที่วัดได้เป็นแรงดันไฟฟ้า ด้วยหลักการตรวจจับฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นเนื่องจากกระแสไหลในตัวนำ โดยฟลักซ์แม่เหล็กเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแส มีคุณสมบัติในการตรวจจับสัญญาณที่มีความถี่ไฟตรง 35 kHz มีพิกัดกระแส 200 แอมป์ แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตสูงสุด 5 โวลต์ $\pm 1\%$ ส่วนสัญญาณเปรียบเทียบของกระแสอัลเทอร์เนเตอร์ต่อไปนี้ จะขอเรียกเป็น คำสั่งการผลิตกระแสอัลเทอร์เนเตอร์ (I^*_{alt}) ซึ่งเกิดจากการรวมกันของค่ากระแสภาระทางไฟฟ้ากับกระแสประจุเข้าแบตเตอรี่ ตามสมการดังนี้

$$I^*_{alt} = I_{load} + I_{charge} \tag{3.5}$$

โดยที่ I^*_{alt} = คำสั่งการผลิตกระแสอัลเทอร์เนเตอร์

I_{load} = กระแสของภาระทางไฟฟ้า

I_{charge} = กระแสอัดประจุแบตเตอรี่

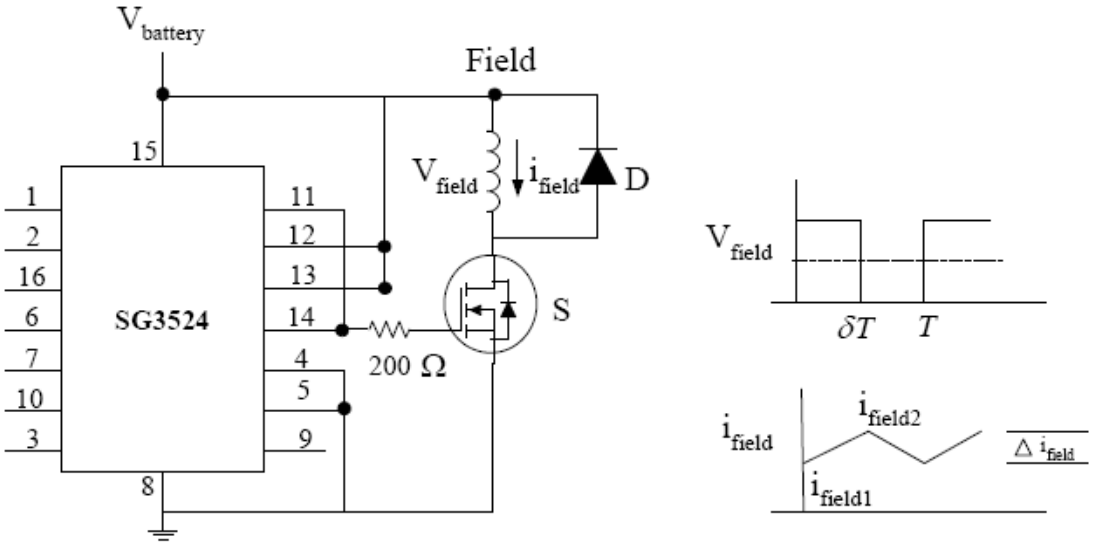
การใช้งานของตัวเซนเซอร์กระแสมีข้อจำกัดในเรื่องการใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบเดี่ยว (Single Style Power Supply) เนื่องจากตัวเซ็นเซอร์กระแสรับแรงดันไฟเลี้ยงปกติที่ 5 โวลต์ ทำให้แรงดันไฟฟ้าเอาท์พุทของตัวเซนเซอร์ที่ค่ากระแสเริ่มต้นเท่ากับ 0 แอมป์ มีค่าแรงดันไฟฟ้า 2.5 โวลต์ ($\frac{VCC}{2}$) เป็นผลให้การออกแบบวงจรในส่วนคำสั่งการผลิตกระแสอัลเทอร์เนเตอร์ต้องมีแรงดันไฟฟ้าออฟเซต (offset) เพื่อสามารถเปรียบเทียบกับกระแสอัลเทอร์เนเตอร์ที่วัดได้จริงจากตัวเซ็นเซอร์กระแสอัลเทอร์เนเตอร์ ระหว่างขา 1 กับขา 2 ของไอซี SG3524N โดยอาศัยการทำงานของวงจรออปแอมป์

ภาคแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงทำหน้าที่จ่ายแรงดันไฟเลี้ยงให้กับวงจร VCC แบ่งออกเป็น 2 ชุด คือ วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงของวงจรออปแอมป์และไอซี SG3524N ด้วยแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่ (B+, B-) กับวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงของตัวเซ็นเซอร์กระแส และตั้งค่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงของวงจร VCC ด้วยแรงดันไฟฟ้าควบคุม 5 โวลต์ของ LM7805

3.6.2 <u>การสร้างส่วนควบคุมสวิตซ์</u>

การทำส่วนนี้จะใช้ตัวต้านทานขนาด 200Ω ต่อไว้ที่ขาเกท (G) ของมอสเฟตเพื่อใช้เป็นตัวจำกัดขนาดของกระแสที่เข้าไปในมอสเฟต ดังแสดงในรูปที่ 3.28 การทำงานของวงจรเป็น

ลักษณะชอปเปอร์ (chopper) คลาส D แหล่งจ่ายไฟกระแสตรง (V_{bat}) ถูกจ่ายไปยังสวิตช์มอสเฟต (S) และภาระความเหนี่ยวนำสวิตช์จะทำงานด้วยคาบเวลา (T) สวิตช์จะปิด (close) ที่เวลา $t_{on} = \delta T \ (0 \le \delta \le 1)$ ซึ่งตัวแปร $\delta = \frac{t_{on}}{T}$ นั้น เรียกว่า ค่าดิวตี้ไซเคิล (Duty cycle) ของวงจรชอปเปอร์ เมื่อมีสัญญาณมาควบคุมแบบไบแอสตรงสวิตช์จะนำกระแส และเมื่อไม่มีสัญญาณควบคุมสวิตช์จะหยุดนำกระแส ณ ช่วงเวลาในการทำงานของสวิตช์ $(0 \le t \le \delta t)$ ซึ่งภาระความเหนี่ยวนำจะได้รับแรงดันกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเพิ่มมากขึ้นจาก i_{field1} เป็น i_{field2} สวิตช์จะถูกเปิดที่เวลา $t = \delta T$ เวลาที่สวิตช์หยุดทำงาน $(\delta T \le t \le T)$ นั้น ค่าความเหนี่ยวนำของภาระยังคงให้กระแสไหลอย่างต่อเนื่องผ่านไดโอด (D) แรงดันที่ความเหนี่ยวนำจะมีค่าเป็นศูนย์ (ไม่คิดแรงดันตกคร่อมที่ไดโอด) กระแสจะลดลงจาก i_{field2} เป็น i_{field1} ช่วงเวลา $(0 \le t \le 1)$ เรียกว่าช่วงเวลาดิวตี้ และช่วงเวลา $(\delta T \le t \le T)$ เรียกว่า ช่วงเวลา Freewheeling ไดโอดจะนำกระแสในขณะที่สวิตช์เปิด (open) ทำให้กระแสค่าความเหนี่ยวนำไหลอย่างต่อเนื่องและยังป้องกันแรงดันชั่วขณะที่ตกคร่อมสวิตช์ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงกระแสความเหนี่ยวนำในทันทีทันใด

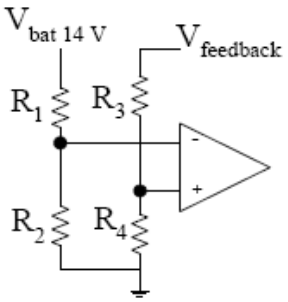


รูปที่ 3.28 การต่อส่วนขับมอสเฟต

3.6.3 <u>การสร้างแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงและการกำหนดความถี่</u>

แรงดันไฟฟ้าอ้างอิงสร้างโดยใช้การแบ่งแรงดันไฟฟ้าจากตัวต้านทานในการแบ่งแรงดันไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 3.29 ตามสมการดังนี้

$$V_{bus,ref} = V_{bat14V} \frac{R_2}{(R_1 + R_2)} \tag{3.6}$$



รูปที่ 3.29 การตั้งค่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง

หลักการกำหนดค่าความถี่ จะกำหนดโดยค่าความต้านทาน (R_T) และค่าการเก็บประจุ (C_T) ซึ่งจะหาค่าความถี่ได้จากสมการดังนี้

$$f \approx \frac{1.30}{R_T C_T} \tag{3.7}$$

โดยที่ R_T ใช้ในหน่วย กิโลโอห์ม ($k\Omega$)

C_T ใช้ในหน่วย ไมโครฟารัด(μF)

f ใช้ในหน่วย กิโลเฮิรตซ์ (kHz)

สำหรับค่าความต้านทานที่ใช้กันอยู่ในช่วง 1.8-100 $k\Omega$ ค่าการเก็บประจุอยู่ที่ 0.001-0.1 μF ซึ่งจะทำให้ค่าความถี่เปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 130 Hz -722 kHz แต่สำหรับวงจรควบคุมในโครงงานนี้เราเลือกใช้ค่าการเก็บประจุอยู่ที่ 0.022 μF และค่าความต้านทานปรับค่าได้ 0-10 $k\Omega$ เพื่อใช้ในการปรับเปลี่ยนค่าความถี่

3.6.4 <u>ตัวควบคุมอัตโนมัติ</u> (Auto controller)

ตัวควบคุมอัตโนมัติมีหน้าที่เปรียบเทียบสัญญาณทางออกของระบบ กับค่าที่ต้องการควบคุมระบบหรือค่าที่ใช้อ้างอิง (ค่าที่เข้ากับระบบ) ผลการเปรียบเทียบได้ค่าที่เบี่ยงเบนหรือค่าที่ผิดพลาดไป ตัวควบคุมอัตโนมัติจะนำสัญญาณเบี่ยงเบนไปสร้างเป็นสัญญาณเพื่อควบคุมให้ระบบลดค่าผิดพลาดเหล่านั้นลงจนกลายเป็นศูนย์ หรือลดน้อยที่สุดเท่าที่ตัวควบคุมสามารถทำได้ ในงานวิจัยนี้ ได้เลือกใช้ตัวควบคุมแบบปริพันธ์ (Integral controller) ระหว่างขา1 กับขา 9 ของไอซี SG3524N อัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณทางออกของตัวควบคุม เป็นปฏิภาคโดยตรงกับค่าของสัญญาณผิดพลาดซึ่งเขียนเป็นสมการอนุพันธ์ (Differential Equation) ได้ดังนี้

$$V_{out}(t) = \frac{1}{T}\int_0^t V_{in}dt \tag{3.8}$$

$$V_{out}(t) = \frac{1}{T}V_{in}(t) \tag{3.9}$$

เมื่อ $V_{out}(t) =$ สัญญาณทางออกของตัวควบคุม

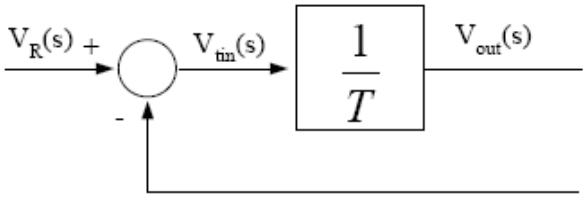
$V_{in}(t) =$ สัญญาณทางเข้า (สัญญาณผิดพลาด)

T = ค่าคงที่เวลาของการควบคุมแบบแบบปริพันธ์

สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function)

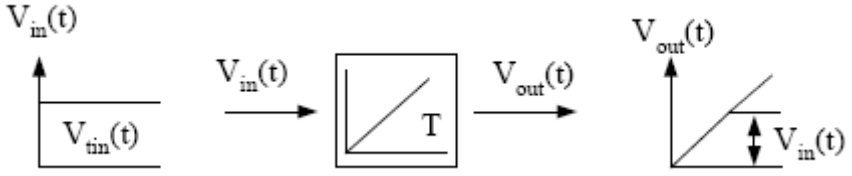
$$F(s) = \frac{V_{out}(s)}{V_{in}(S)} = \frac{1}{T(S)} \tag{3.10}$$

และเขียนแผนผังและผลตอบสนองต่อฟังก์ชันขั้นบันได ดังแสดงในรูปที่ 3.30



รูปที่ 3.30 แผนผังของตัวควบคุมแบบแบบปริพันธ์

เมื่อ $V_R(s)$ เป็นสัญญาณอ้างอิง โดยปกติจะใช้ฟังก์ชันขั้นบันได (Step response)



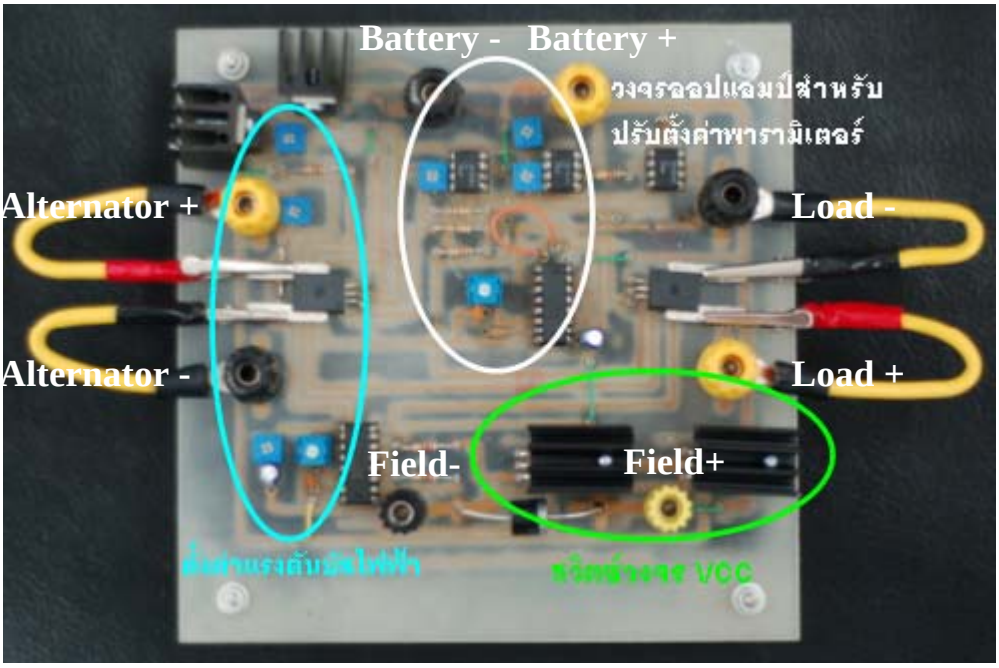
รูปที่ 3.31 ผลตอบสนองต่อฟังก์ชันขั้นบันไดของตัวควบคุมแบบแบบปริพันธ์

จากสมการที่ (3.10) สัญญาณทางเข้าเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า อัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณทางออกของตัวควบคุมจะเร็วขึ้นเป็นสองเท่าด้วย และถ้าสัญญาณทางเข้าเป็นศูนย์ ค่าของสัญญาณทางออกจะคงที่

3.7 การตั้งค่าต่างๆ บนวงจรควบคุมแรงดันและกระแสไฟฟ้าของอัลเทอร์เนเตอร์

วงจรต้นแบบของการควบคุมแรงดันและกระแสไฟฟ้าของอัลเทอร์เนเตอร์ (VCC Prototype) แสดงดังรูปที่ 3.32 กำหนดความถี่ในการทำงานของวงจรพัลส์วิดธ์มอดูเลตชัน ที่ 30 kHz และตั้งค่าตัวควบคุมปริพันธ์โดยใช้ คาปาซิแตนซ์ขนาด 0.1 μF

คำสั่งการผลิตกระแสอัลเทอร์เนเตอร์ (I^{*}_{alt}) ที่ได้จากวงจรออปแอมป์ เริ่มต้นตั้งค่าแรงดันไฟฟ้าของกระแสประจุไฟแบตเตอรี่ ($I_{bat,charge}$) ไว้ที่ 2.5 โวลต์ ในกรณีที่ต้องการให้กระแสประจุไฟเข้าแบตเตอรี่ เท่ากับ 0 แอมป์ เมื่อต้องการให้มีกระแสประจุไฟเข้าแบตเตอรี่เพิ่มมากขึ้น ให้ตั้งค่าแรงดันไฟฟ้าของกระแสประจุไฟแบตเตอรี่ ($I_{bat,charge}$) เพิ่มสูงขึ้น โดยการปรับค่าแรงดันไฟฟ้า 0.01 โวลต์ เทียบได้กับ ต้องการให้กระแสไหลเข้าแบตเตอรี่ 1 แอมป์



รูปที่ 3.32 วงจรต้นแบบของการควบคุมแรงดันและกระแสไฟฟ้าของอัลเทอร์เนเตอร์

การตั้งค่าแรงดันบัสไฟฟ้าอ้างอิงของวงจร VCC มีค่าเท่ากับ 9 โวลต์ (จากแรงดันบัสไฟฟ้า 14.4 โวลต์) โดยใช้ความต้านทานปรับค่าได้ 1 $M\Omega$ 2 ตัว ที่ต่อกันในลักษณะแบ่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า (Voltage Divider) เช่นเดียวกันกับแรงดันไฟฟ้าป้อนกลับของแรงดันบัสไฟฟ้า เพื่อเปรียบเทียบกับแรงดันบัสไฟฟ้าอ้างอิง

ลักษณะการเชื่อมต่อวงจร VCC เข้ากับอัลเทอร์เนเตอร์รถยนต์และภาระ เพื่อทดสอบการทำงานของวงจร VCC เป็นดังนี้

- ขั้ว “Field +” ของวงจร VCC ต่อเข้ากับขั้ว “F+” ของอัลเทอร์เนเตอร์และขั้ว “Field -” ของวงจร VCC ต่อเข้ากับขั้ว “F-” ของอัลเทอร์เนเตอร์ เพื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับขดลวดโรเตอร์
- ขั้ว “Battery +” ของวงจร VCC ต่อเข้ากับขั้วบวกของแบตเตอรี่และขั้ว “Battery -” ของวงจร VCC ต่อเข้ากับขั้วลบของแบตเตอรี่ เพื่อเป็นแหล่งจ่ายกำลังให้กับวงจร VCC
- ขั้ว “Alternator +” ของวงจร VCC ต่อเข้ากับขั้ว “B” ของอัลเทอร์เนเตอร์และขั้ว “Alternator -” ของวงจร VCC ต่อเข้ากับขั้วบวกของแบตเตอรี่ เพื่อให้กระแสที่ผลิตโดยอัลเทอร์เนเตอร์ไหลผ่านตัวเซนเซอร์กระแสอัลเทอร์เนเตอร์
- ขั้ว “Load +” ของวงจร VCC ต่อเข้ากับภาระและขั้ว “Load -” ของวงจร VCC ต่อเข้ากับขั้วลบของแบตเตอรี่ เพื่อให้กระแสที่ผลิตโดยอัลเทอร์เนเตอร์ไหลผ่านตัวเซนเซอร์กระแสภาระ