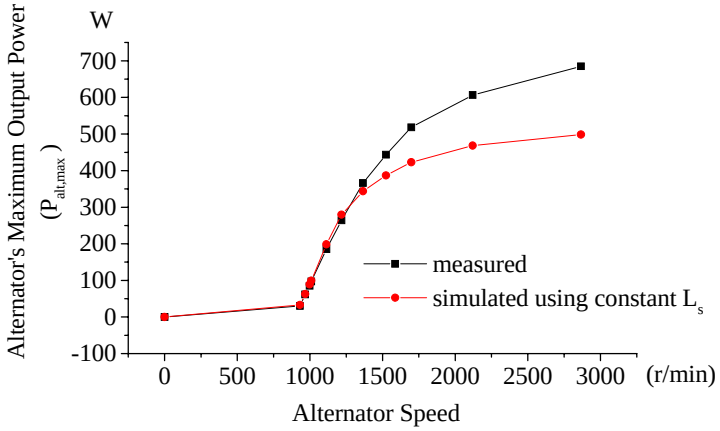
บทที่ 4

การทดสอบและวิเคราะห์ข้อมูล

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงวิธีการทดสอบและผลการทำงานของวงจรคุมค่าแรงดันบัสและกระแสอัลเทอร์เนเตอร์ (Voltage and Current Controller: VCC) ในการควบคุมกำลังไฟฟ้าที่ผลิตโดยอัลเทอร์เนเตอร์กับผลจำลองการทำงานของระบบอัลเทอร์เนเตอร์ เพื่อแสดงความสามารถการทำนายค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตอัลเทอร์เนเตอร์โดยเปรียบเทียบกับผลการวัดจริงของระบบอัลเทอร์เนเตอร์ การทำนายกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตอัลเทอร์เนเตอร์มีหลายปัจจัยที่เกี่ยวข้อง เนื่องจากค่ากระแสอัลเทอร์เนเตอร์จะเปลี่ยนแปลงตามความเร็วรอบอัลเทอร์เนเตอร์และความต้องการกำลังไฟฟ้าของภาระ การพัฒนาแบบจำลองอย่างง่ายจึงมีความสำคัญต้องการวิเคราะห์และทดสอบการทำงานของระบบให้ได้ค่าใกล้เคียงกับระบบการใช้งานจริงที่ซับซ้อน ผลการทดสอบจะชี้ให้เห็นว่า อัลเทอร์เนเตอร์รถยนต์แบบลันเดลล์ที่ใช้อยู่กันทั่วไปในปัจจุบันนั้น ค่าความเหนี่ยวนำซิงโครนัสมีผลอย่างยิ่งต่อการทำนายค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตโดยอัลเทอร์เนเตอร์ เมื่อเป็นเช่นนั้น ความถูกต้องของแบบจำลองระบบไฟฟ้ารถยนต์จึงขึ้นอยู่กับความถูกต้องของค่าตัวแปรที่มีผลต่อการทำนายค่ากำลังไฟฟ้าอัลเทอร์เนเตอร์แบบลันเดลล์ ดังเช่น ค่าความเหนี่ยวซิงโครนัสบนขดลวดอาร์เมเจอร์ที่โดยทั่วไปจะกำหนดให้เป็นค่าคงที่ ดังเช่นในงานวิจัย [7-9] ซึ่งจะให้ค่าความถูกต้องในช่วงค่าหนึ่งเท่านั้น อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติ การใช้งานความเหนี่ยวนำซิงโครนัสอาร์เมเจอร์จะครอบคลุมทุกช่วงการทำงาน จึงส่งผลให้การหาค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตโดยอัลเทอร์เนเตอร์แบบลันเดลล์ มีผลคลาดเคลื่อนถึง 25 % ดังแสดงในรูปที่ 4.1 เพื่อให้สามารถทำนายค่ากำลังไฟฟ้าได้ถูกต้องยิ่งขึ้นและครอบคลุมย่านการทำงานของอัลเทอร์เนเตอร์แบบลันเดลล์ ในการจำลองระบบกำลังไฟฟ้าอัลเทอร์เนเตอร์แบบลันเดลล์ เลือกใช้ตัวแปรความเหนี่ยวนำซิงโครนัสเฉลี่ยที่แปรผันตามกระแสฟิลด์ ในย่านการทำงานของอัลเทอร์เนเตอร์แบบลันเดลล์

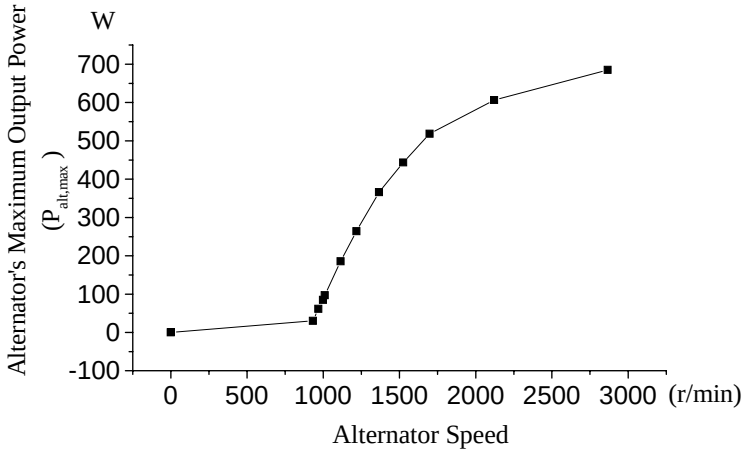
ส่วนการทำงานของวงจร VCC เพื่อควบคุมกำลังไฟฟ้าที่ผลิตโดยอัลเทอร์เนเตอร์ ได้แสดงผลการทำงานของอัลเทอร์เนเตอร์โดยแยกออกเป็นกรณีเพื่อให้สามารถเห็นผลลัพธ์ได้ชัดเจน เกี่ยวกับจุดประสงค์ในการพัฒนาระบบอัลเทอร์เนเตอร์ด้วยการแสดงผลเปรียบเทียบการทำงานของวงจร VCC กับวงจรโวลต์เตจเร็กกูเลเตอร์ที่ใช้อยู่ในรถยนต์ทั่วไป



รูปที่ 4.1 ความแตกต่างของค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จากผลการจำลองของกำลังไฟฟ้าอัลเทอร์เนเตอร์มากสุด ($P_{alt,max}$) เปรียบเทียบกับกำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตโดยอัลเทอร์เนเตอร์แบบลันเดลล์ ในกรณีเลือกใช้ค่าความเหนี่ยวที่เป็นค่าคงที่

4.1 <u>วิธีการตรวจสอบความถูกต้องแบบจำลองระบบอัลเทอร์เนเตอร์กับผลการวัดจริง</u>

การตรวจสอบความถูกต้องกับผลการวัด จะแบ่งออกเป็น 2 กรณี ได้แก่ การตรวจสอบกำลังไฟฟ้ามากสุดที่ผลิตโดยอัลเทอร์เนเตอร์ ($P_{alt,max}$) กับการตรวจสอบกำลังไฟฟ้าที่ผลิตโดยอัลเทอร์เนเตอร์สำหรับภาระ 200 วัตต์ ในแต่ละความเร็วรอบอัลเทอร์เนเตอร์ ผลการทดสอบปรากฏ ดังแสดงในรูปที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ

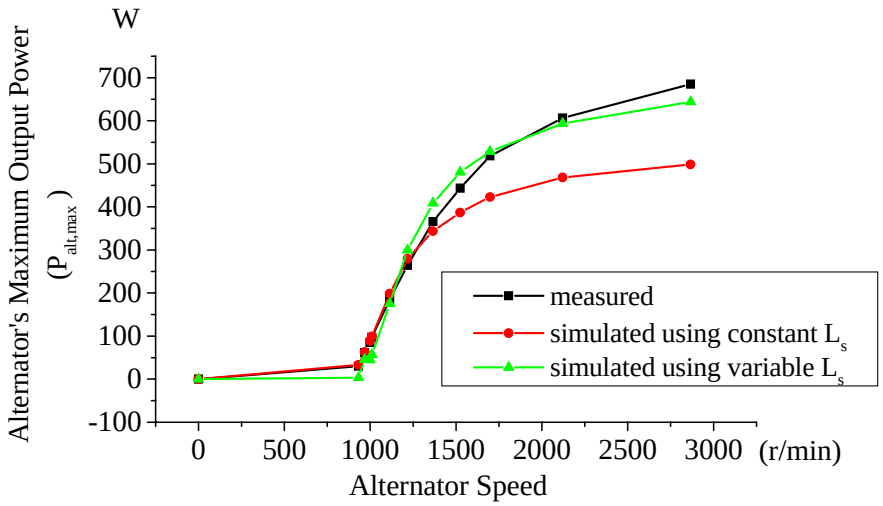


รูปที่ 4.2 กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตมากสุดของอัลเทอร์เนเตอร์ ($P_{alt,max}$) โดยที่เปลี่ยนแปลงค่าภาระ 25 – 800 วัตต์

ผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตมากสุดของอัลเทอร์เนเตอร์ ($P_{alt,max}$) โดยทดสอบกับภาระ 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700 และ 800 วัตต์ ด้วยการปรับความเร็วรอบอัลเทอร์เนเตอร์จนกระทั่งกระแสแบตเตอรี่เท่ากับศูนย์ ซึ่งทำให้แรงดันแบตเตอรี่คงที่ (แรงดันแบตเตอรี่ที่ทดสอบอยู่ที่ 12.42 โวลต์) ดังแสดงในรูปที่ 4.2 เป็นกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตมากสุด ของแต่ละความเร็วรอบที่อัลเทอร์เนเตอร์สามารถผลิตได้ ในขณะที่ค่ากระแสฟิลด์สูงสุด ($i_{f,\max}$) อยู่ที่ประมาณ 3.6 แอมแปร์ ในกรณีนี้ ค่ากระแสฟิลด์ไม่ได้ถูกควบคุมจากโวลต์เตจเร็กกูเลเตอร์ เนื่องจากแรงดันบัสไฟฟ้ามีค่าไม่ถึง 14.4 โวลต์ จึงทำให้โวลต์เตจเร็กกูเลเตอร์ยังไม่ทำงาน เป็นผลให้กระแสฟิลด์ (i_f) มีค่ากระแสสูงสุดตลอดการทดสอบ

หมายเหตุ: ค่ากระแสฟิลด์สูงสุดนี้ขึ้นอยู่แรงดันแบตเตอรี่ที่จ่ายให้กับขดลวดกระแสฟิลด์ หากในกรณีที่แรงดันแบตเตอรี่สูงกว่าค่าที่ทดสอบ คือ 12.42 โวลต์ ก็จะเป็นผลให้ค่ากระแสฟิลด์สูงสุดเปลี่ยนไปจากค่าเดิมที่สูงขึ้นเช่นกัน (สามารถมีค่ามากกว่า 3.6 แอมป์ได้)

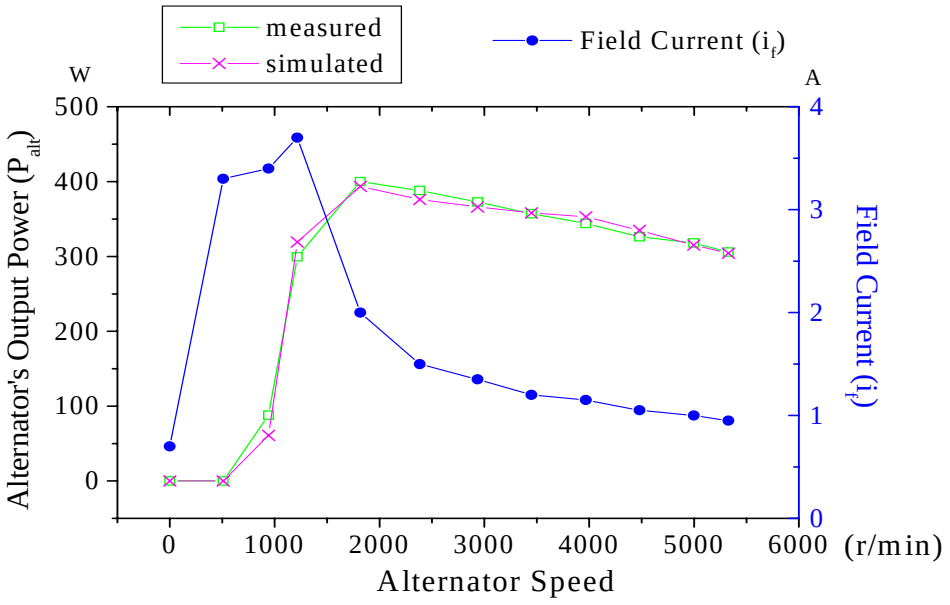
การทดสอบกำลังไฟฟ้ามากสุด ($P_{alt,max}$) ในแต่ละความเร็วรอบของอัลเทอร์เนเตอร์แบบลันเดลล์ เพื่อแสดงผลการเปรียบเทียบแบบจำลองกำลังไฟฟ้าอัลเทอร์เนเตอร์ที่ใช้ค่าความเหนี่ยวนำซิงโครนัสคงที่กับค่าความเหนี่ยวนำซิงโครนัสแปรผันเฉลี่ยโดยมีการเปลี่ยนแปลงค่าของภาระ 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700 และ 800 วัตต์



รูปที่ 4.3 ผลการวัดและผลการจำลองของกำลังไฟฟ้ามากสุดที่ผลิตโดยอัลเทอร์เนเตอร์ ($P_{alt,max}$) เปรียบเทียบในกรณีเลือกใช้ค่าความเหนี่ยวนำซิงโครนัสคงที่กับค่าความเหนี่ยวนำซิงโครนัสแปรผันเฉลี่ย

กำลังไฟฟ้าอัลเทอร์เนเตอร์แบบลันเดลล์ที่เลือกใช้ค่าความเหนี่ยวนำซิงโครนัส 350 μH ที่เป็นแบบค่าคงที่ ซึ่งได้จากการใช้ฟังก์ชัน “lsqcurvefit” บนโปรแกรม Matlab สำหรับหาค่าความเหนี่ยวนำที่เหมาะสมตามสมการ (3.3) โดยอาศัยข้อมูลการทดสอบเปิดวงจรและการลัดวงจรของอัลเทอร์เนเตอร์ จะพบว่ากำลังไฟฟ้าอัลเทอร์เนเตอร์ที่ได้มีผลคลาดเคลื่อนไปมากถึง 25% เมื่อเปรียบเทียบกับค่าวัดได้จริง ส่วนผลที่ได้จากการเลือกใช้ความเหนี่ยวนำซิงโครนัสแปรผันเฉลี่ย ดังที่เสนอ ให้ค่ากำลังไฟฟ้าอัลเทอร์เนเตอร์ใกล้เคียงกับผลการวัดโดยมีค่าคลาดเคลื่อนไม่เกิน 5 % แสดงว่าแบบจำลองกำลังไฟฟ้าอัลเทอร์เนเตอร์ที่เลือกใช้ความเหนี่ยวนำซิงโครนัสเฉลี่ยที่แปรผันตามกระแสฟิลด์สามารถทำนายกำลังไฟฟ้าอัลเทอร์เนเตอร์ได้ถูกต้องแม่นยำมากขึ้นและครอบคลุมย่านการทำงานของอัลเทอร์เนเตอร์ เพียงแต่วิธีการทำเพื่อให้ได้ความเหนี่ยวนำซิงโครนัสเฉลี่ยที่แปรผันตามกระแสฟิลด์ยังคงมีความซับซ้อนและยุ่งยากกว่า

การตรวจสอบกำลังไฟฟ้าที่ผลิตโดยอัลเทอร์เนเตอร์สำหรับภาระ 200 วัตต์ โดยมีโวลต์เตจเร็กกูเลเตอร์เป็นตัวควบคุมค่ากระแสฟิลด์ ในแต่ละความเร็วรอบอัลเทอร์เนเตอร์ที่กำหนด การตรวจสอบในกรณีนี้มีจุดประสงค์เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองกำลังไฟฟ้าอัลเทอร์เนเตอร์แบบลันเดลล์ที่เลือกใช้ความเหนี่ยวนำซิงโครนัสเฉลี่ยที่แปรค่าตามกระแสฟิลด์ ครอบคลุมในช่วงการทำงานของอัลเทอร์เนเตอร์



รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบผลการวัดและผลการจำลองของกำลังไฟฟ้าอัลเทอร์เนเตอร์

ผลการตรวจสอบกำลังไฟฟ้าอัลเทอร์เนเตอร์แบบลันเดลล์ บนโปรแกรม Matlab มีค่าใกล้เคียงกับผลการวัดในช่วงที่กระแสฟิลด์มีค่าน้อยๆ แต่ในช่วงกระแสฟิลด์มีค่าสูง จะให้ผลการทำนายกำลังไฟฟ้าอัลเทอร์เนเตอร์คลาดเคลื่อนได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.3 เนื่องจากในช่วงค่ากระแสฟิลด์ 0 - 1.4 แอมป์ มีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นกับแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร

จากรูปที่ 4.4 จะสังเกตได้ว่า กำลังไฟฟ้าที่อัลเทอร์เนเตอร์ผลิตได้มีค่ามากกว่าความต้องการกำลังไฟฟ้าของภาระ ทั้งนี้เพราะกำลังไฟฟ้าส่วนหนึ่งจะนำไปอัดประจุไฟฟ้าให้กับแบตเตอรี่

ลักษณะกราฟกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของอัลเทอร์เนเตอร์ที่ แสดงดังรูปที่ 4.4 สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงออกเป็น 3 ช่วง ดังนี้

ช่วงแรก เป็นช่วงที่กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตเป็นศูนย์เนื่องจากการบล็อกของไดโอด (Diode Blocking)

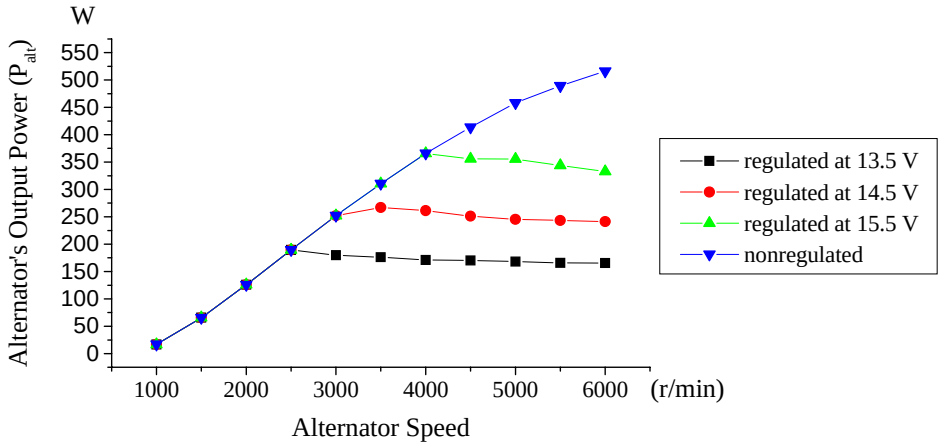
ช่วงกลาง เป็นช่วงที่กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามความเร็วรอบอัลเทอร์เนเตอร์และกระแสฟิลด์ ในช่วงนี้กระแสฟิลด์มีค่าสูงสุด กำลังไฟฟ้าที่ได้จึงเป็นกำลังไฟฟ้าสูงสุด ($P_{alt,max}$) ที่ความเร็วรอบ ณ ขณะนั้น

ช่วงท้าย เป็นช่วงที่กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตมีแนวโน้มลดลง ขณะที่ความเร็วรอบอัลเทอร์เนเตอร์เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตมีความสัมพันธ์แบบผกผันกับความเร็วรอบอัลเทอร์เนเตอร์ ($P_{alt} \propto \frac{1}{\omega}$) ในช่วงนี้ กระแสฟิลด์ถูกคุมค่าโดยโวลต์เตจเร็กกูเลเตอร์ เพื่อป้องกันไม่ให้แรงดันบัสไฟฟ้าเกินกว่าค่าที่กำหนดไว้ กำลังไฟฟ้าอัลเทอร์เนเตอร์ที่ได้จึงลดลงต่ำกว่าค่าสูงสุดในช่วงกลาง

ส่วนความสัมพันธ์ความเร็วรอบอัลเทอร์เนเตอร์กับกระแสฟิลด์ แบ่งการพิจารณาออกเป็น 2 ช่วง คือช่วงที่กระแสฟิลด์แปรผันตามความเร็วรอบของอัลเทอร์เนเตอร์ ($i_f \propto \omega$) กับช่วงที่กระแสฟิลด์แปรผกผันกับความเร็วรอบของอัลเทอร์เนเตอร์ ($i_f \propto \frac{1}{\omega}$) เหตุที่เป็นเช่นนี้ เพราะว่าแรงดันบัสไฟฟ้ายังไม่เกินกว่าค่าที่กำหนดไว้ ทำให้โวลต์เตจเร็กกูเลเตอร์ยังไม่ได้ทำงาน แต่ถ้าความเร็วรอบอัลเทอร์เนเตอร์เพิ่มสูงขึ้นถึงจุดหนึ่ง ซึ่งเป็นจุดที่ทำให้แรงดันบัสไฟฟ้าเกินค่าที่ได้กำหนดไว้ จะเป็นผลให้ โวลต์เตจเร็กกูเลเตอร์ตอบสนองกับกระแสฟิลด์หรือกล่าวได้ว่าค่ากระแสฟิลด์ถูกควบคุมโดยโวลต์เตจเร็กกูเลเตอร์ เพื่อรักษาระดับแรงดันบัสไฟฟ้า ไม่ให้เกินค่าที่กำหนดไว้

จากรูปที่ 4.5 เป็นผลของกำลังไฟฟ้าอัลเทอร์เนเตอร์ที่ได้จากการจำลองการทำงานของระบบอัลเทอร์เนเตอร์บนโปรแกรม Matlab/Simulink ที่มีการควบคุมแรงดันบัสไฟฟ้าค่าต่างๆ โดยกำหนดให้ $L_s = 350\mu H$, $R_s = 0.058\Omega$, $V_{bat} = 12\,V$, $R_{int} = 0.1\Omega$, $R_{load} = 0.8\,\Omega$, $R_{wire} = 0.1\Omega$, $R_f = 3.4\,\Omega$, $L_f = 100\,mH$ เพื่อแสดงถึงกำลังไฟฟ้าที่อัลเทอร์เนเตอร์ผลิตได้

เกี่ยวข้องกับแรงดันบัสไฟฟ้าระบบอัลเทอร์เนเตอร์ แต่ในทางปฏิบัติ การที่จะควบคุมกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของอัลเทอร์เนเตอร์โดยเปลี่ยนแปลงแรงดันบัสไฟฟ้าอ้างอิงตามความต้องการกำลังไฟฟ้าของภาระและระบบประจุแบตเตอรี่ ไม่สามารถทำได้โดยตรง ต้องตั้งค่าแรงดันบัสอ้างอิงก่อนที่ค่าหนึ่ง แต่เมื่อนำไปใช้งานจริง ความต้องการกำลังไฟฟ้าขึ้นอยู่กับภาระและระบบประจุไฟแบตเตอรี่ ณ ขณะนั้น ซึ่งหากตั้งค่าแรงดันบัสไฟฟ้าอ้างอิงสูงไปจะมีผลกับอุปกรณ์ไฟฟ้าในรถยนต์ได้ ในกรณีที่อัลเทอร์เนเตอร์มีความเร็วรอบสูง อัลเทอร์เนเตอร์ก็จะผลิตกำลังไฟฟ้าออกมามากเกินความจำเป็น เพราะความสามารถสูงสุดในการผลิตกำลังไฟฟ้าของอัลเทอร์เนเตอร์จะเท่ากับสมการมุมกำลังไฟฟ้า (Power angle equation) แต่ถ้าตั้งค่าแรงดันไฟฟ้าบัสต่ำเกินไป ความสามารถในการผลิตกำลังไฟฟ้าของอัลเทอร์เนเตอร์จะลดลง เนื่องจากผลการทำงานของโวลต์เตจเร็กกูเลเตอร์ซึ่งเข้าไปควบคุมกระแสฟิลด์ กำลังไฟฟ้าที่อัลเทอร์เนเตอร์ผลิตได้ไม่เพียงพอกับความต้องการของภาระ และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต้องทำงานอย่างต่อเนื่องเกิดความสูญเสีย ทำให้ประสิทธิภาพการผลิตกำลังไฟฟ้าอัลเทอร์เนเตอร์ลดลง



รูปที่ 4.5 กำลังไฟฟ้าอัลเทอร์เนเตอร์ที่มีการควบคุมแรงดันบัสไฟฟ้าค่าต่างๆ บนโปรแกรม Matlab/Simulink

การพัฒนาวงจร VCC มีความน่าสนใจในเรื่องการควบคุมให้อัลเทอร์เนเตอร์ทำงานตามสภาวะของภาระแล้ว ยังสามารถรับคำสั่ง (command) ปริมาณกระแสอัดประจุให้แบตเตอรี่แบบคงที่ซึ่งส่งผลดีกับระบบการจัดการด้านพลังงาน (ถ้าในรถยนต์มีระบบการจัดการด้านพลังงาน) อีกส่วนที่มีความสำคัญ คือโวลต์เตจเร็กกูเลเตอร์ ทำงานแค่เพียงจำกัดแรงดันบัสไฟฟ้าอ้างอิงที่ค่าสูงเท่านั้น เป็นผลให้ที่ความเร็วรอบอัลเทอร์เนเตอร์ต่ำ ก่อนที่ระบบอัลเทอร์เนเตอร์จะไปถึงค่าแรงดันบัสไฟฟ้า ไม่มีการควบคุมกำลังไฟฟ้าใดๆ การควบคุมให้อัลเทอร์เนเตอร์ทำงาน

ตามสภาวะของภาระ โดยอาศัยการแปรค่ากระแสขดลวดสนามโรเตอร์ ส่งผลดีกับระบบประจุไฟฟ้าโดยรวม เนื่องจากการทำงานของระบบจะพิจารณาให้อัลเทอร์เนเตอร์เป็นแหล่งจ่ายพลังงานหลัก (Major Source) คือ ระบบจะพยายามให้อัลเทอร์เนเตอร์จ่ายพลังงานให้กับภาระก่อนเป็นอันดับแรก ถ้าความต้องการของภาระเกินค่าพิกัดของอัลเทอร์เนเตอร์แล้ว ถึงจะให้แบตเตอรี่จ่ายพลังงานในส่วนที่ไม่เพียงพอ ซึ่งแสดงว่า แหล่งพลังงานแบตเตอรี่เป็นแหล่งพลังงานสำรอง (Backup Source) อย่างแท้จริง การควบคุมการผลิตของอัลเทอร์เนเตอร์ตามความต้องการกำลังไฟฟ้าด้วยเทคนิคทางอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ส่งผลให้สามารถควบคุมพลังงานสำรองในแบตเตอรี่ได้เช่นกัน ยกตัวอย่างเช่น ในสภาวะความต้องการกำลังไฟฟ้าน้อยและแบตเตอรี่มีพลังงานสำรองที่สูง ระบบก็จะสามารถบังคับให้อัลเทอร์เนเตอร์ผลิตกำลังไฟฟ้าให้น้อยลงได้เพื่อให้เพียงพอกับความต้องการของภาระเท่านั้น ทั้งนี้ เพื่อป้องกันการอัดประจุเข้าแบตเตอรี่มากเกินไป (Overcharge) การอัดประจุเข้าแบตเตอรี่มากเกินไป นอกจากจะเป็นการใช้พลังงานอย่างสูญเปล่าแล้ว ทำให้อายุการใช้งานของแบตเตอรี่สั้นลงอีกด้วย นอกจากนี้ ถ้าเราสามารถควบคุมการผลิตกำลังไฟฟ้าตามความต้องการของภาระได้แล้ว เราก็จะควบคุมให้กระแสอัดประจุเข้าแบตเตอรี่เป็นค่าคงที่ (หรือตามรูปแบบที่ต้องการ) ได้ ถึงแม้จะเกิดการเปลี่ยนแปลงสภาวะของภาระก็ตาม ส่งผลให้สามารถอัดประจุแบตเตอรี่ได้อย่างเหมาะสม เช่น สามารถอัดประจุแบตเตอรี่จนเต็มได้ในเวลาที่สั้นลง หรือยืดอายุการใช้งานแบตเตอรี่ แนวคิดดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงการจัดการกำลังไฟฟ้า เพื่อให้ระบบกำลังไฟฟ้าทำงานร่วมกันได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

ต่อไปนี้จะเป็นการทดสอบระบบอัลเทอร์เนเตอร์ด้วยวงจร VCC เพื่อให้สามารถเข้าใจการทำงานของวงจรได้ชัดเจน จึงทำการทดสอบด้วยการสร้างเงื่อนไขการทำงานขึ้นมาสำหรับใช้ทดสอบและแสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างโวลต์เตจเร็กกูเลเตอร์แบบที่นิยมใช้กันทั่วไป (Conventional Voltage Regulator) กับวงจร VCC ที่นำเสนอ (Proposed Voltage and Current Controller) ดังมีรายละเอียดต่อนี้

4.2 ทดสอบและเปรียบเทียบผลการทำงานวงจร VCC ที่นำเสนอกับวงจรโวลต์เตจเร็กกูเลเตอร์แบบที่ใช้งานทั่วไป

วงจร VCC สามารถควบคุมการผลิตกำลังไฟฟ้าของอัลเทอร์เนเตอร์ได้ในช่วงที่กว้างขึ้น ก่อนที่จะถึงพิกัดแรงดันบัสไฟฟ้าอ้างอิง ($V_{bus,ref}$) หรืออาจจะกล่าวได้ว่า การควบคุมการผลิตกำลังไฟฟ้าของอัลเทอร์เนเตอร์เกิดขึ้นเนื่องจากการคุมค่ากระแสไฟฟ้าของอัลเทอร์เนเตอร์ ส่วนพิกัดแรงดันบัสไฟฟ้าอ้างอิงจะเป็นการควบคุมเนื่องจากการทำงานของระบบคุมค่าแรงดันไฟฟ้า

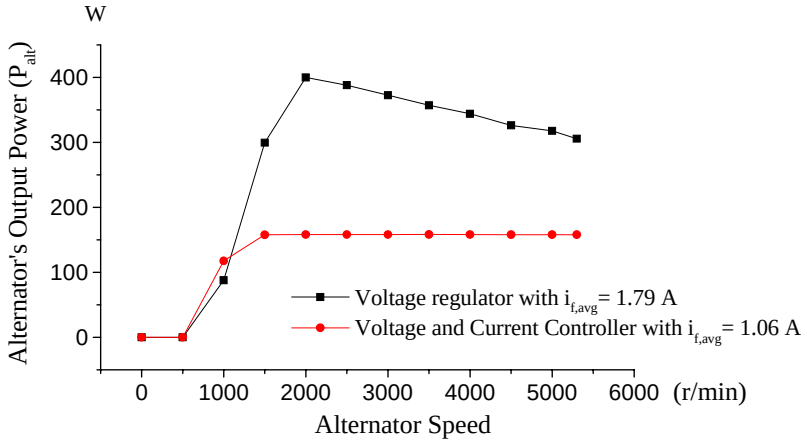
ของอัลเทอร์เนเตอร์ ซึ่งจะควบคุมไม่ให้แรงดันบัสไฟฟ้าเกินค่าที่กำหนดไว้ วงจร VCC สามารถควบคุมกระแสไหลเข้าแบตเตอรี่ให้เป็นศูนย์ได้ ($I_{bat,charge} = 0$) ในกรณีที่ไม่ต้องการให้มีการอัดประจุไฟเข้าแบตเตอรี่ และสามารถควบคุมกระแสไฟฟ้าไหลเข้าแบตเตอรี่ให้เป็นค่าคงที่ได้ ($I_{bat,charge} = constant$) เมื่อต้องการให้มีการประจุไฟเข้าแบตเตอรี่ได้อย่างต่อเนื่อง ความจำเป็นที่จะต้องกำหนดกระแสประจุไฟแบตเตอรี่ให้เป็นศูนย์ มีหลายเหตุผล อาทิเช่น แบตเตอรี่มีระดับพลังงานที่สูงอยู่แล้วและในขณะนั้นความต้องการกำลังไฟฟ้าของภาระมีไม่มาก อัลเทอร์เนเตอร์สามารถที่จะจ่ายกำลังไฟฟ้าไปให้ได้กับภาระได้เอง หรือความต้องการจากระบบการจัดการด้านพลังงานเกี่ยวกับพลังงานในแบตเตอรี่ ซึ่งกำหนดให้เก็บพลังงานในแบตเตอรี่แค่ 80% [13] เพื่อประโยชน์ในเรื่องการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Power transfer)

ระบบประจุไฟแบตเตอรี่ที่ควบคุมด้วยโวลต์เตจเร็กกูเลเตอร์ในรถยนต์ทั่วไป ไม่สามารถที่จะควบคุมกำลังไฟฟ้าอัลเทอร์เนเตอร์ได้ในช่วงก่อนที่จะถึงพิกัดแรงดันบัสไฟฟ้า เนื่องจากการทำงานของโวลต์เตจเร็กกูเลเตอร์ จะตรวจสอบเฉพาะพิกัดแรงดันบัสไฟฟ้าขอบบน หากแรงดันบัสไฟฟ้ายังไม่เกินกว่าค่าที่ตั้งไว้ โวลต์เตจเร็กกูเลเตอร์จะไม่มีการควบคุมใดๆ ซึ่งเท่ากับว่าในช่วงก่อนที่จะถึงพิกัดแรงดันบัสไฟฟ้าขอบบน อัลเทอร์เนเตอร์จะผลิตกำลังไฟฟ้าออกมาให้ได้มากที่สุดเท่าที่จะสามารถผลิตได้ ณ ความเร็วรอบอัลเทอร์เนเตอร์นั้น ซึ่งกำลังไฟฟ้าที่ผลิตโดยอัลเทอร์เนเตอร์จะจ่ายให้ทั้งแบตเตอรี่และภาระ เมื่อแบตเตอรี่ได้รับการประจุไฟ จึงมีกระแสไฟฟ้าไหลเข้าแบตเตอรี่ เป็นผลให้แรงดันที่บัสไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น และเมื่อสูงเกินกว่าค่าที่กำหนด โวลต์เตจเร็กกูเลเตอร์ก็จะทำงาน โดยการคุมค่ากระแสฟิลด์ที่ป้อนให้ขดลวดสนามโรเตอร์

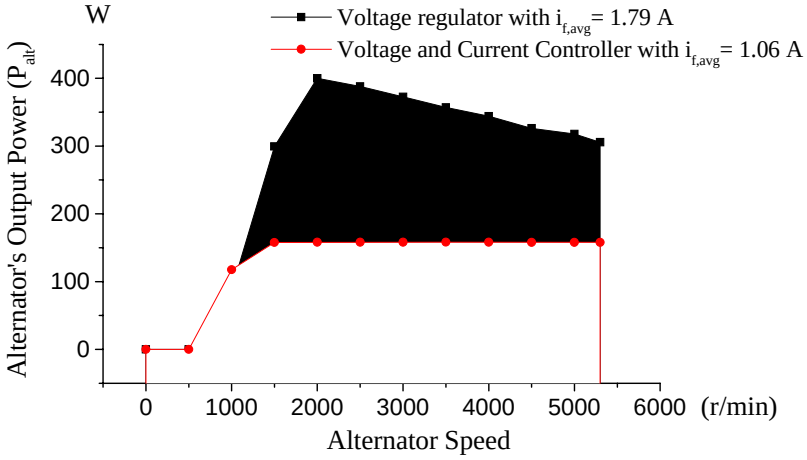
จะเห็นได้ว่า การทำงานของโวลต์เตจเร็กกูเลเตอร์ไม่สามารถควบคุมกำลังการผลิตกำลังไฟฟ้าอัลเทอร์เนเตอร์ได้โดยตรงและไม่สามารถควบคุมกระแสไหลเข้าแบตเตอรี่ให้เป็นศูนย์ได้ ($I_{bat,charge} \neq 0$) ในกรณีที่ไม่ต้องการให้มีการประจุไฟเข้าแบตเตอรี่ หรือแม้กระทั้งเมื่อต้องการให้มีการประจุไฟให้กับแบตเตอรี่ก็ไม่สามารถควบคุมให้กระแสที่ไหลเข้าแบตเตอรี่เป็นค่าคงที่ได้อย่างที่ต้องการ เพื่อประโยชน์ในด้านจัดการพลังงานของรถยนต์

การทดสอบกำลังไฟฟ้าอัลเทอร์เนเตอร์ แบ่งการทดสอบเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นการทดสอบกำลังไฟฟ้าภาระคงที่ ขนาด 160 วัตต์ เพื่อเปรียบเทียบผลการทำงานวงจรต้นแบบ VCC ที่นำเสนอกับโวลต์เตจเร็กกูเลเตอร์แบบที่ใช้งานทั่วไป และแสดงรูปแบบสัญญาณควบคุมกระแสและแรงดันไฟฟ้าของดีซีชอปเปอร์ รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าแต่ละเฟสของอัลเทอร์เนเตอร์และรูปคลื่นกระแสอัลเทอร์เนเตอร์ จากเครื่องวัด Digital storage oscilloscope ส่วนที่สองเป็นการทดสอบวงจรต้นแบบ VCC เมื่อเปลี่ยนแปลงค่ากระแสภาระและความเร็วรอบอัลเทอร์เนเตอร์

4.2.1 การทดสอบกำลังไฟฟ้าที่ผลิตโดยอัลเทอร์เนเตอร์ด้วยหลอดไฟรถยนต์จำนวน 2 หลอด ขนาดกำลังไฟฟ้า 160 วัตต์ ในแต่ละความเร็วรอบอัลเทอร์เนเตอร์ที่กำหนด โดยมีโวลต์เตจเร็กกูเลเตอร์และวงจร VCC เป็นตัวควบคุมค่ากระแสฟิลด์ ซึ่งกำหนดให้กระแสประจุไฟเข้าแบตเตอรี่เท่ากับ 0 และ 5 แอมป์ ($I_{bat,charge} = 0$, 5 A) พร้อมทั้งวัดค่ากระแสอัลเทอร์เนเตอร์เฉลี่ยด้วยแอมป์มิเตอร์ และวัดแรงดันไฟฟ้าด้วยมัลติมิเตอร์ ณ ตำแหน่ง ขั้วอัลเทอร์เนเตอร์ เพื่อนำมาหาค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยอัลเทอร์เนเตอร์ ดังที่แสดงในรูปที่ 4.6 การทดสอบในกรณีนี้มีจุดประสงค์เพื่อเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าอัลเทอร์เนเตอร์เนื่องจากการควบคุมของโวลต์เตจเร็กกูเลเตอร์กับวงจรต้นแบบ VCC



(ก)



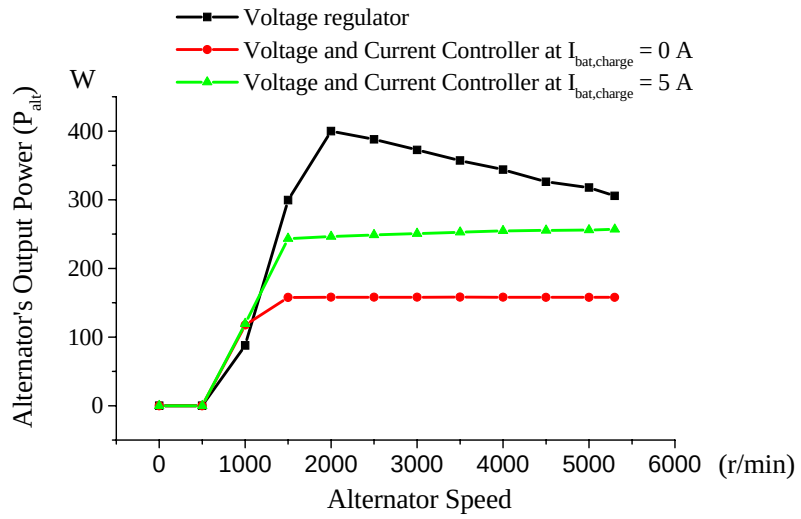
(ข)

รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบผลการควบคุมกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตอัลเทอร์เนเตอร์ระหว่างโวลต์เตจเร็กกูเลเตอร์กับวงจร VCC ในกรณีที่กระแสประจุไฟเข้าแบตเตอรี่เท่ากับ 0 แอมป์

หมายเหตุ $i_{f,avg}$ คือ ค่าเฉลี่ยกระแสฟิลด์ (Field current average) ที่ความเร็วรอบอัลเทอร์เนเตอร์ทั้งหมด

การกำหนดให้กระแสประจุไฟแบตเตอรี่มีค่าเท่ากับ 0 แอมป์ แสดงว่าอัลเทอร์เนเตอร์ผลิตกำลังไฟฟ้าเพื่อจ่ายให้สำหรับภาระเพียงอย่างเดียว คำสั่งในการผลิตกำลังไฟฟ้าจะเท่ากับกระแสภาระโดยตรง พื้นที่สีดำที่ปรากฏในรูปที่ 4.6 (ข) เป็นกำลังไฟฟ้าที่อยู่เหนือความต้องการของภาระ หากสามารถควบคุมให้อัลเทอร์เนเตอร์ผลิตใช้อย่างเพียงพอกับความต้องการของระบบอัลเทอร์เนเตอร์แล้ว กำลังไฟฟ้าส่วนนี้จะมีส่วนช่วยประหยัดพลังงานและเกิดประสิทธิผลในการนำไปใช้งาน หรือหากต้องการกำลังไฟฟ้าส่วนนี้เพื่อนำไปประจุไฟให้แบตเตอรี่ก็ย่อมทำได้โดยกำหนดให้มีการประจุไฟเข้าแบตเตอรี่ 5 แอมป์ ค่าเฉลี่ยกำลังไฟฟ้าที่อัลเทอร์เนเตอร์ผลิตเพิ่มขึ้น 100 วัตต์ ก็จะนำไปประจุไฟเข้าแบตเตอรี่เพื่อเป็นพลังงานสำรองสำหรับจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระในสภาวะที่ต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบทันทีทันใด ดังแสดงในรูปที่ 4.7

เมื่อคิดกำลังไฟฟ้าเฉพาะที่ภาระต้องการ (160 วัตต์) เป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับกำลังไฟฟ้าที่อัลเทอร์เนเตอร์สามารถผลิตได้ทั้งหมด มีค่ากำลังไฟฟ้าน้อยกว่า 50 % เพราะฉะนั้นกำลังไฟฟ้าส่วนที่เพิ่มขึ้นมาจะเป็นตัวบ่งบอกถึงประสิทธิภาพการใช้งานว่าอัลเทอร์เนเตอร์ควรจะผลิตกำลังไฟฟ้าเท่าใด เพื่อความเหมาะสมในการประจุไฟให้กับแบตเตอรี่



รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบผลการควบคุมกำลังไฟฟ้าอัลเทอร์เนเตอร์ระหว่างโวลต์เตจเร็กกูเลเตอร์กับวงจร VCC ในกรณีที่กระแสประจุไฟเข้าแบตเตอรี่เท่ากับ 0 แอมป์ กับกรณีที่กระแสประจุไฟเข้าแบตเตอรี่เท่ากับ 5 แอมป์

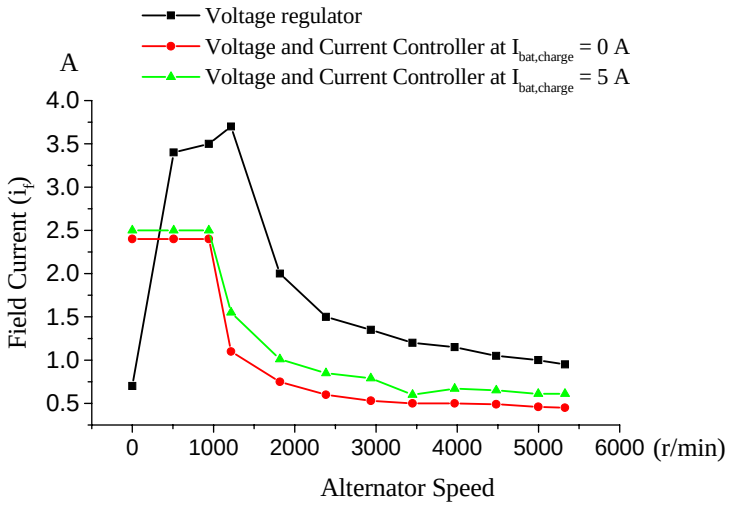
เส้นสีดำ แสดงกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่ได้จากการควบคุมกระแสฟิลด์ด้วยโวลต์เตจเร็กกูเลเตอร์

เส้นสีเขียว แสดงกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่ได้จากการควบคุมกระแสฟิลด์ด้วยวงจรต้นแบบ VCC โดยกำหนดให้กระแสอัดประจุแบตเตอรี่ 5 แอมป์

เส้นสีแดง แสดงกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่ได้จากการควบคุมกระแสฟิลด์ด้วยวงจรต้นแบบ VCC โดยกำหนดให้กระแสอัดประจุแบตเตอรี่ 0 แอมป์

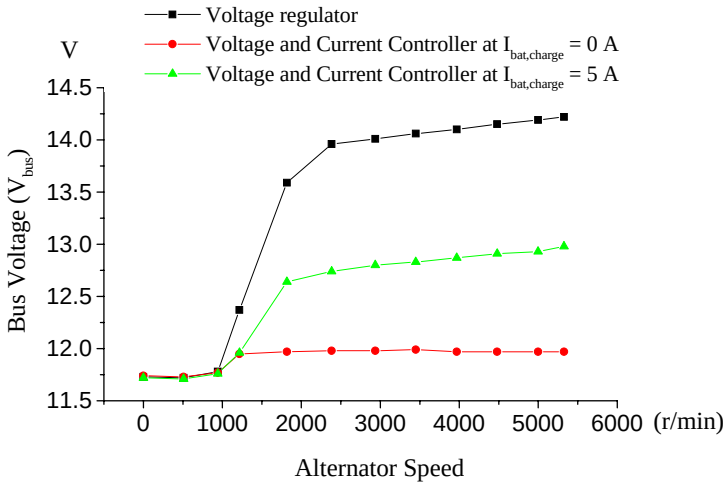
เมื่อผลต่างกำลังไฟฟ้าที่อัลเทอร์เนเตอร์สามารถผลิตได้กับความต้องการกำลังไฟฟ้าของภาระมีค่าแตกต่างกันมาก เป็นผลให้กระแสฟิลด์ถูกพิจารณาในเรื่องการสูญเสียที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในการประยุกต์ใช้งาน ถ้าเปรียบเทียบกันแล้วการควบคุมกระแสฟิลด์ด้วยโวลต์เตจเร็กกูเลเตอร์ มีการสูญเสียมากกว่าวงจร VCC ถ้าการสูญเสียในตัวอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์คิดมาจาก $i_f^2 R$ เมื่อ R เป็นความต้านทานภายในของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

การเปลี่ยนแปลงของกระแสฟิลด์ต่อความเร็วรอบอัลเทอร์เนเตอร์ แสดงดังรูปที่ 4.8 เมื่อความเร็วรอบอัลเทอร์เนเตอร์เพิ่มสูงขึ้น แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่ากระแสฟิลด์จะลดลงแบบไม่เป็นเชิงเส้นและมีรูปแบบเดียวกันทั้งการควบคุมด้วยโวลต์เตจเร็กกูเลเตอร์และวงจรต้นแบบ VCC แต่จะต่างกันที่ความเร็วรอบเริ่มต้นของอัลเทอร์เนเตอร์ เนื่องจากโวลต์เตจเร็กกูเลเตอร์มีส่วนที่เกี่ยวข้องกับการตรวจสอบแรงดันเฟสของอัลเทอร์เนเตอร์ (V_s) จึงควบคุมกระแสฟิลด์ให้มีค่าน้อยๆ และจะเริ่มจ่ายกระแสฟิลด์เต็มที่เมื่อความเร็วรอบอัลเทอร์เตอร์เพิ่มสูงขึ้น ณ ความเร็วรอบประมาณ 1,500 รอบ/นาที เป็นต้นไป



รูปที่ 4.8 ผลของกระแสฟิลด์ที่ถูกควบคุมด้วยวงจรโวลต์เตจเร็จกูเลเตอร์กับวงจร VCC ในกรณีที่กระแสประจุไฟเข้าแบตเตอรี่เท่ากับ 0 แอมป์ และ 5 แอมป์

แรงดันบัสไฟฟ้าของระบบอัลเทอร์เนเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.9 จะเห็นว่าเส้นแรงดันบัสไฟฟ้าที่ควบคุมด้วยโวลต์เตจเร็กกูเลเตอร์ มีค่าใกล้เคียง 14.2 ±0.2 โวลต์ เป็นแรงดันบัสไฟฟ้าอ้างอิงที่ได้ตั้งค่าไว้อยู่ที่ 14.4 โวลต์ ซึ่งอยู่ในช่วงค่าแรงดันไฟฟ้าที่อุปกรณ์ไฟฟ้าสามารถทำงานได้ แต่แรงดันบัสไฟฟ้าของระบบอัลเทอร์เนเตอร์ที่ได้จากการควบคุมด้วยวงจรต้นแบบ VCC มีค่าอยู่ที่ 12 โวลต์ สำหรับแบตเตอรี่ที่ไม่มีการอัดประจุไฟฟ้า และ12.75 โวลต์ สำหรับแบตเตอรี่ที่ได้รับการอัดประจุด้วยกระแส 5 แอมป์ โดยปกติแล้วแรงดันบัสไฟฟ้าของระบบอัลเทอร์เนเตอร์มีการกระเพื่อมของรูปคลื่นสัญญาณ เนื่องจากผลการทำงานของวงจรเรียงกระแสเต็มบริจด์ ส่งผลให้อายุการใช้งานของอุปกรณ์มีโอกาสสั้นลง แต่ค่าแรงดันบัสไฟฟ้าที่เป็นผลจากการทำงานของวงจรต้นแบบ VCC ให้ค่าแรงดันบัสไฟฟ้าที่ต่ำกว่าพิกัดแรงดันบัสไฟฟ้าอ้างอิงของโวลต์เตจเร็กกูเลเตอร์ ซึ่งเป็นผลดีกับอุปกรณ์ไฟฟ้าของรถยนต์

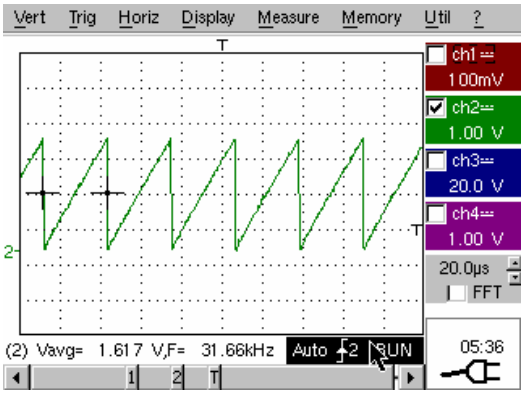


รูปที่ 4.9 ผลของแรงดันบัสไฟฟ้า (V_{bus}) เนื่องมาจากการทำงานของวงจรโวลต์เตจเร็กกูเลเตอร์กับวงจร VCC ในกรณีที่กระแสประจุไฟเข้าแบตเตอรี่เท่ากับ 0 แอมป์ และ 5 แอมป์

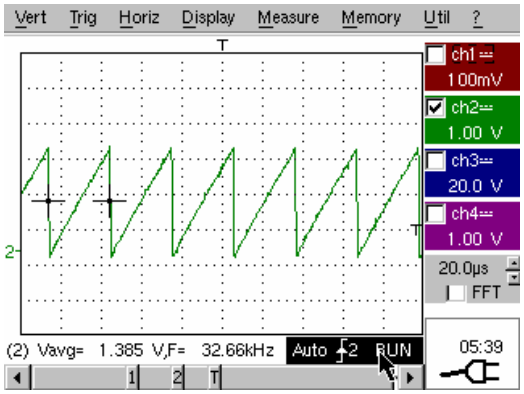
ในรูปที่ 4.10 แสดงรูปคลื่นสัญญาณแรมป์ (Ramp signal) ของสัญญาณควบคุมความกว้างของพัลส์ (Pulse width modulation) สำหรับไอซี SG3524N เพื่อควบคุมกระแสและแรงดันบัสไฟฟ้าอัลเทอร์เนเตอร์ โดยมีขนาดอยู่ 1.61 โวลต์ และ 1.38 โวลต์ ตามลำดับ สัญญาณแรมป์มีค่าความถี่ 30 kHz ซึ่งเป็นค่าความถี่ในการทำงานของวงจรพัลส์วิดล์มอดูเลตชัน

ในรูปที่ 4.11 ลักษณะรูปคลื่นกระแสฟิลด์เป็นรูปคลื่นกระแสตรงแบบกระเพื่อม อันเนื่องจากผลของวงจรเรียงกระแสของอัลเทอร์เนเตอร์ ค่ากระแสฟิลด์เฉลี่ยอยู่ที่ 1.40 แอมป์ สัญญาณยอดแหลม (Spike) ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าระหว่างจุดยอดบน-ล่าง (V_{pp}) อยู่ที่ 11.42

โวลต์ ซึ่งในการออกแบบได้เลือกใช้มอสเฟตกำลัง IRF540N ที่มีพิกัดกระแส 33 แอมป์ แรงดันไฟฟ้าตกคร่อม 100 โวลต์ จึงไม่ได้รับผลเสียหาย เช่นเดียวกับรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าของวงจรดีซีชอปเปอร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.12 มีค่าเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมขดลวดสนามโรเตอร์ 5.95 โวลต์ และแรงดันไฟฟ้าระหว่างจุดยอดบน-ล่าง (V_{pp}) อยู่ที่ 31.13 โวลต์ ค่าความกว้างของพัลส์คิดจากเวลา $T_{fall} - T_{rise}$ ได้เท่ากับ 15.52 μs ซึ่งเป็นช่วงเวลาในการทำงานของสวิตช์ ใน 1 ไซเคิลมีคาบเวลาเท่ากับ 29.88 μs เมื่อคิดเป็นค่าดิวตี้ไซเคิล (Duty cycle) ของดีซีชอปเปอร์ อยู่ที่ 51.94 % ถ้าความเร็วรอบอัลเทอร์เนเตอร์เพิ่มสูงขึ้น ขณะที่กำลังไฟฟ้าภาระยังอยู่ที่ 160 วัตต์ เป็นผลให้ค่าดิวตี้ไซเคิลลดต่ำลง แต่เมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้าภาระ ที่ความเร็วรอบอัลเทอร์เนเตอร์ 1,500 รอบ/นาที จะเป็นผลให้ค่าดิวตี้ไซเคิลเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งเกิดจากการควบคุมการทำงานของไอซี SG3524N ของกระแสอัลเทอร์เนเตอร์



(ก)

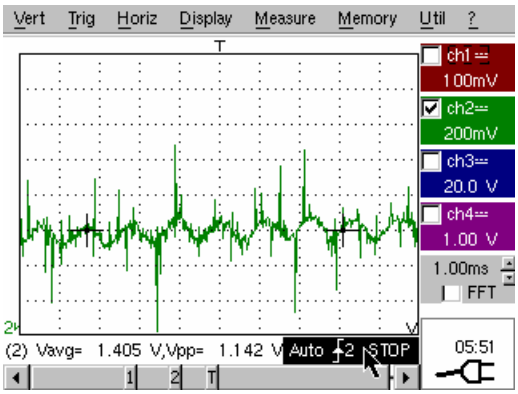


(ข)

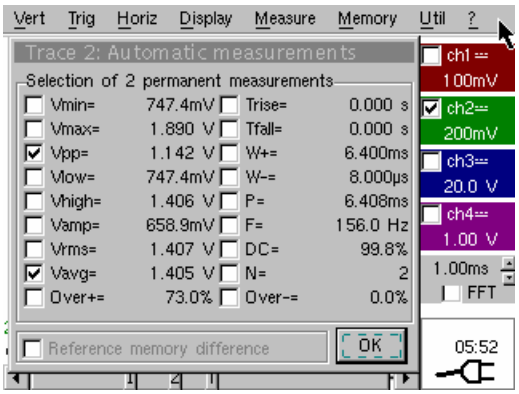
รูปที่ 4.10 รูปคลื่นสัญญาณแรมป์ (Ramp signal) ของสัญญาณควบคุมความกว้างของพัลส์

(ก) รูปคลื่นสัญญาณแรมป์ของไอซี SG3524N ควบคุมกระแสอัลเทอร์เนเตอร์

(ข) รูปคลื่นสัญญาณแรมป์ของไอซี SG3524N ควบคุมแรงดันบัสไฟฟ้าอัลเทอร์เนเตอร์

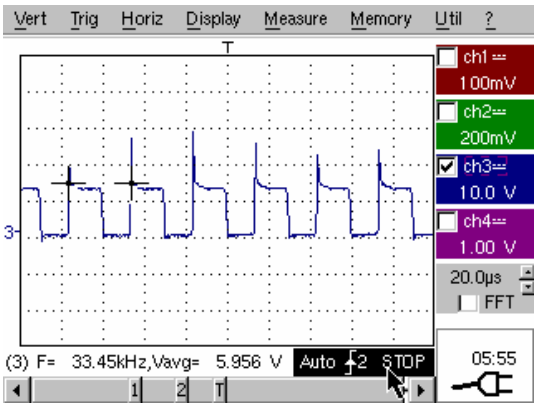


(ก) รูปคลื่นกระแสฟิลด์ของดีซีชอปเปอร์

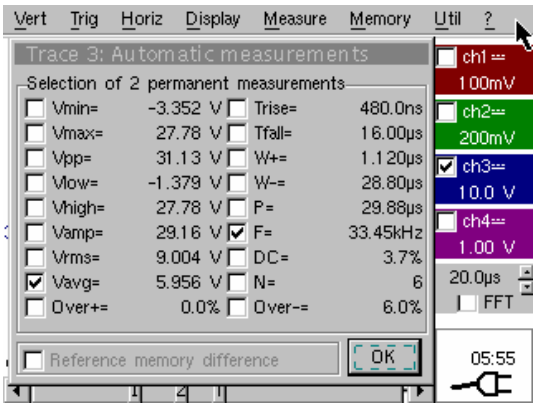


(ข) ผลการวัดรูปคลื่นกระแสฟิลด์

รูปที่ 4.11 รูปคลื่นกระแสฟิลด์ของดีซีชอปเปอร์ ที่ความต้องการกำลังไฟฟ้าของภาระ 160 วัตต์ ความเร็วรอบอัลเทอร์เนเตอร์ 1,500 รอบ/นาที



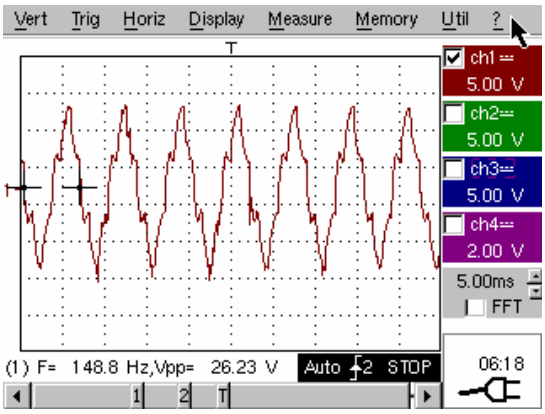
(ก) รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าของดีซีชอปเปอร์



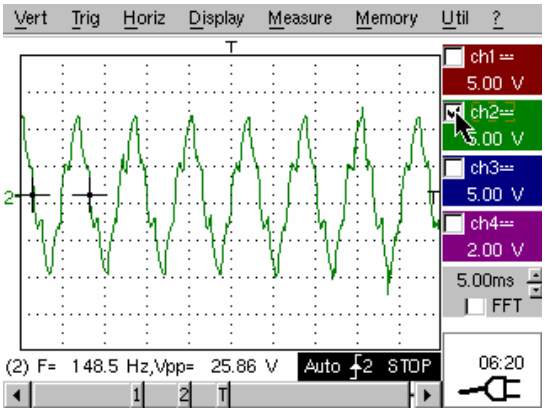
(ข) ผลการวัดรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า

รูปที่ 4.12 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าของดีซีชอปเปอร์ ที่ความต้องการกำลังไฟฟ้าของภาระ 160 วัตต์ ความเร็วรอบอัลเทอร์เนเตอร์ 1,500 รอบ/นาที

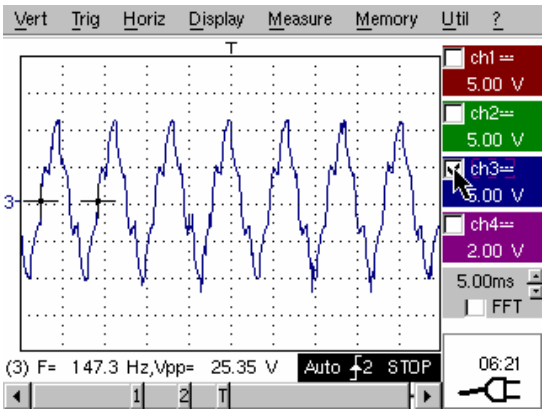
รูปสัญญาณแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำแต่ละเฟสของอัลเทอร์เนเตอร์ ณ ตำแหน่งก่อนเข้าวงจรเรียงกระแสเต็มบริจด์ที่ความต้องการกำลังไฟฟ้าของภาระ 160 วัตต์ ความเร็วรอบอัลเทอร์เนเตอร์ 1500 รอบ/นาที แสดงดังรูปที่ 4.13 ลักษณะแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำต้านกลับ (Back EMF Voltage: V_s) เป็นสัญญาณรูปคลื่นไซน์ มีขนาดประมาณ 25 โวลต์ ใกล้เคียงกันทั้ง 3 เฟส แต่จะมีมุมแตกต่างกัน 120° มีค่าความถี่ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ อยู่ที่ 148 Hz แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะถูกส่งต่อไปยังวงจรเรียงกระแส 3 เฟสของอัลเทอร์เนเตอร์เพื่อแปลงเป็นแรงไฟฟ้ากระแส



(ก) รูปคลื่นแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเฟส A ของอัลเทอร์เนเตอร์



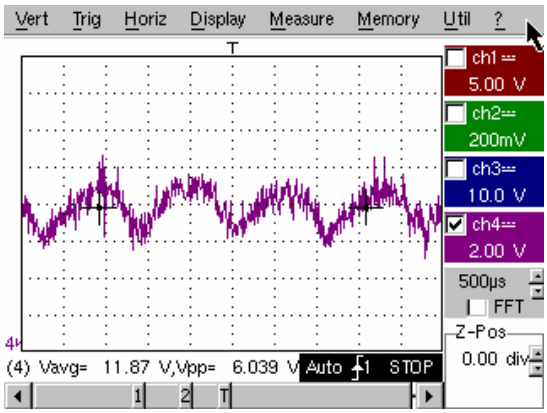
(ข) รูปคลื่นแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเฟส B ของอัลเทอร์เนเตอร์



(ค) รูปคลื่นแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเฟส C ของอัลเทอร์เนเตอร์

รูปที่ 4.13 รูปคลื่นแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำแต่ละเฟสของอัลเทอร์เนเตอร์ ณ ตำแหน่งก่อนเข้าวงจรเรียงกระแสเต็มบริจด์ที่ความต้องการกำลังไฟฟ้าของภาระ 160 วัตต์ ความเร็วรอบอัลเทอร์เนเตอร์ 1,500 รอบ/นาที

รูปคลื่นกระแสอัลเทอร์เนเตอร์ ณ ตำแหน่งขั้วของอัลเทอร์เนเตอร์ที่ความต้องการกำลังไฟฟ้าของภาระ 160 วัตต์ ความเร็วรอบอัลเทอร์เนเตอร์ 1,500 รอบ/นาที แสดงดังรูปที่ 4.14 โดยวัดจาก Oscilloscope clamp มีลักษณะเป็นรูปคลื่นกระแสตรงแบบกระเพื่อม (ripple) ขนาด 6.03 โวลต์ และค่ากระแสอัลเทอร์เนเตอร์เฉลี่ย 11.87 แอมป์

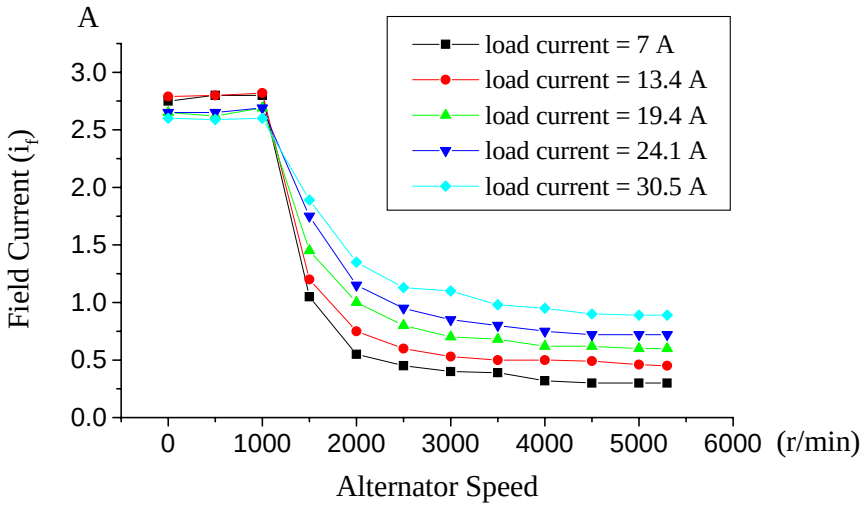


รูปที่ 4.14 รูปคลื่นกระแสอัลเทอร์เนเตอร์ ณ ตำแหน่งขั้วของอัลเทอร์เนเตอร์ที่ความต้องการกำลังไฟฟ้าของภาระ 160 วัตต์ ความเร็วรอบอัลเทอร์เนเตอร์ 1,500 รอบ/นาที

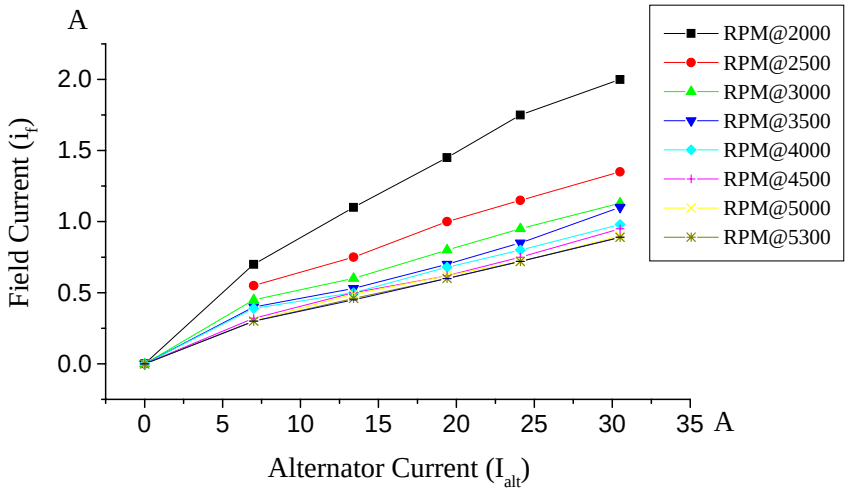
4.2.2 ทดสอบการทำงานของวงจรต้นแบบ VCC โดยเปลี่ยนแปลงค่ากระแสภาระและความเร็วรอบอัลเทอร์เนเตอร์ ในกรณีที่กระแสอัดประจุไฟแบตเตอรี่เป็น 0 และ 5 แอมป์ ($I_{bat,charge} = 0$, 5 A) เริ่มต้นการทดสอบที่ความเร็วรอบอัลเทอร์เนเตอร์ 2,000 รอบ/นาที เป็นต้นไป เพื่อให้เหมาะสมกับช่วงการทำงานของอัลเทอร์เนเตอร์

ความสัมพันธ์ของกระแสฟิลด์กับความเร็วรอบอัลเทอร์เนเตอร์เป็น 2 ลักษณะ ในช่วงแรกจะมีลักษณะเป็นเส้นตรงไม่แปรผันตามความเร็วรอบอัลเทอร์เนเตอร์ เนื่องจากกระแสฟิลด์ที่จ่ายให้ขดลวดโรเตอร์ มาจากแบตเตอรี่เพราะที่ความเร็วรอบดังกล่าวต่ำกว่าความเร็วรอบช่วงหมุนเปล่า (Ideal Speed) ของอัลเทอร์เนเตอร์ อัลเทอร์เนเตอร์ไม่สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าออกมาได้ เมื่อความเร็วรอบอัลเทอร์เนเตอร์เพิ่มสูงขึ้น กระแสฟิลด์เริ่มมีเปลี่ยนแปลงแบบผกผันกับความเร็วรอบอัลเทอร์เนเตอร์ในลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น แต่เป็นไปในแนวทางเดียวกัน ดังที่แสดงในรูป 4.15 เช่นเดียวกันความสัมพันธ์ของกระแสฟิลด์กับกระแสอัลเทอร์เนเตอร์ ค่ากระแสฟิลด์มีแนวโน้มลดลงเมื่อความเร็วอัลเทอร์เนเตอร์เพิ่มสูง เนื่องมาจากกระแสฟิลด์ในช่วงความเร็วรอบต่ำอัลเทอร์เนเตอร์ไม่สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้จึงกระตุ้นด้วยกระแสฟิลด์ที่ค่าหนึ่ง แต่เมื่อความเร็วรอบอัลเทอร์เนเตอร์เพิ่มสูงขึ้น อัลเทอร์เนเตอร์สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าออกมาได้ กระแสฟิลด์ก็ถูก

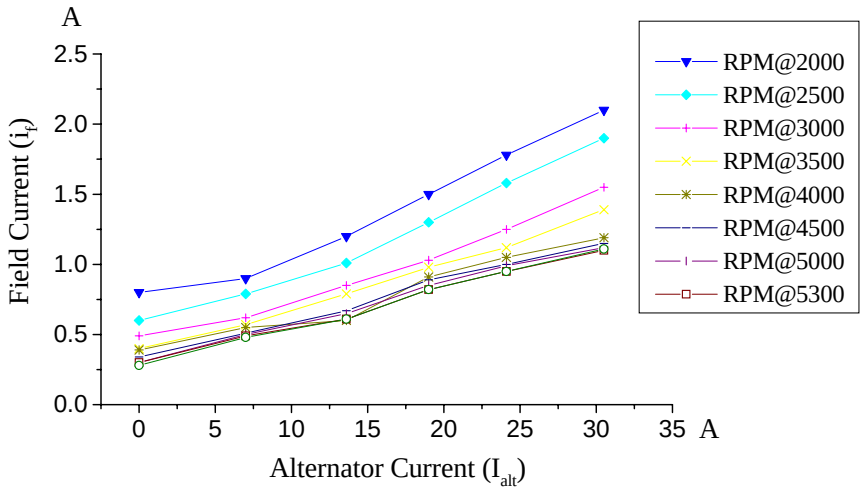
คุมค่าให้ป้อนกระแสให้โรเตอร์น้อยลง เนื่องจากผลการทำงานของวงจร VCC ส่วนในกลุ่มที่สอง ความเร็วรอบอัลเทอร์เนเตอร์มากพอ จนทำให้กระแสฟิลด์ถูกคุมค่าจากวงจร VCC ตั้งแต่ที่กระแสอัลเทอร์เนเตอร์น้อยๆ จนถึงค่ากระแสอัลเทอร์เนเตอร์มีค่ามาก ความสัมพันธ์ของกระแสฟิลด์กับกระแสอัลเทอร์เนเตอร์ มีลักษณะเป็นเชิงเส้นเพิ่มมากขึ้นเมื่อความเร็วรอบอัลเทอร์เนเตอร์มากๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.16 และ 4.17 ตามลำดับ



รูปที่ 4.15 ผลของกระแสฟิลด์ที่ถูกควบคุมด้วยวงจรคุมค่าแรงดันบัสและกระแสไฟฟ้าอัลเทอร์เนเตอร์ ที่ความต้องกำลังไฟฟ้าของภาระต่างๆ ในกรณีที่กระแสประจุไฟเข้าแบตเตอรี่เท่ากับ 0 แอมป์

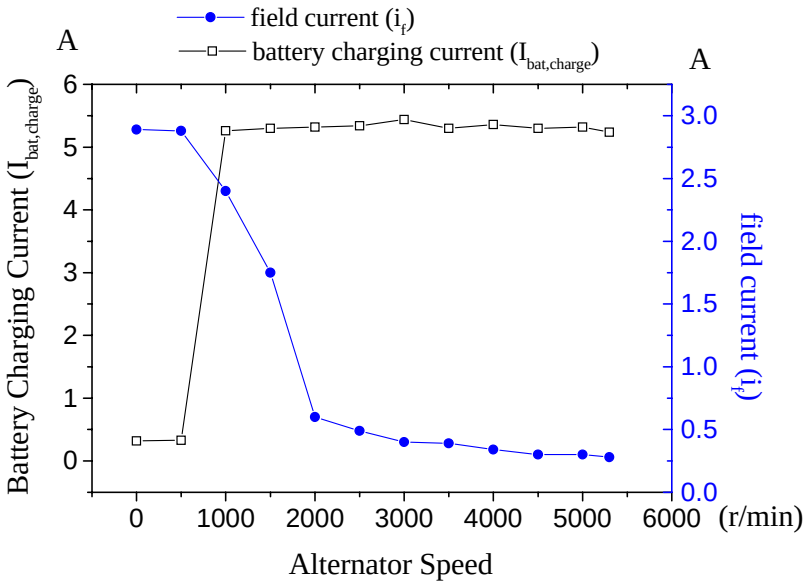


รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์กระแสฟิลด์กับกระแสอัลเทอร์เนเตอร์โดยกำหนดให้กระแสประจุไฟแบตเตอรี่เท่ากับ 0 แอมป์ ที่ความเร็วรอบอัลเทอร์เนเตอร์ต่างๆ



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์กระแสฟิลด์กับกระแสอัลเทอร์เนเตอร์โดยกำหนดให้กระแสประจุไฟเข้าแบตเตอรี่เท่ากับ 5 แอมป์ ที่ความเร็วรอบอัลเทอร์เนเตอร์ต่างๆ

4.2.3 การทดสอบการทำงานของวงจรต้นแบบ VCC กับระบบอัลเทอร์เนเตอร์รถยนต์ เมื่อระบบอัลเทอร์เนเตอร์ไม่มีภาระ แต่กำหนดให้มีกระแสประจุไฟเข้าแบตเตอรี่ 5 แอมป์ ที่ความเร็วรอบต่างๆ ของอัลเทอร์เนเตอร์ การทดสอบนี้มีจุดประสงค์เพื่อแสดงผลการทำงานของวงจรต้นแบบ VCC ในกรณีที่มีกระแสอัดประจุไฟเข้าแบตเตอรี่คงที่



รูปที่ 4.18 ผลการควบคุมกระแสฟิลด์ด้วยวงจร VCC ในกรณีที่กระแสประจุไฟเข้าแบตเตอรี่คงที่ 5 แอมป์ ขณะที่อัลเทอร์เนเตอร์ไม่ได้เชื่อมต่อกับภาระ

ผลการทำงานของวงจรต้นแบบ VCC แสดงให้เห็นความสามารถในการควบคุมกระแสอัดประจุไฟเข้าแบตเตอรี่ได้ต่อเนื่องและคงที่ตามที่กำหนดไว้ 5 แอมป์ ส่วนการแปรผันของกระแสฟิลด์เป็นไปในลักษณะเดียวกันกับกรณีที่ระบบอัลเทอร์เนเตอร์มีภาระมาเชื่อมต่ออยู่