บทที่ 5

การอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาและพัฒนาวงจรโวลต์เตจเร็กกูเลเตอร์ที่ใช้ในรถยนต์ทั่วไปให้เป็นวงจรคุมค่าแรงดันบัสและกระแสอัลเทอร์เนเตอร์ (Voltage and Current Controller: VCC) สำหรับควบคุมการผลิตกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตอัลเทอร์เนเตอร์ โดยเน้นศึกษาในส่วนของความสามารถที่ควบคุมการไหลของกระแสแบตเตอรี่ เพื่อประโยชน์ด้านการจัดการพลังงานและประสิทธิภาพในด้านการใช้งานของระบบอัลเทอร์เนเตอร์ ซึ่งข้อได้เปรียบของวงจรคุมค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าของอัลเทอร์เนเตอร์ (VCC) ที่นำเสนอ สามารถสรุปได้ดังนี้

1. วงจร VCC สามารถควบคุมการผลิตกำลังไฟฟ้าของอัลเทอร์เนเตอร์ได้ในช่วงที่กว้างขึ้น ก่อนที่จะถึงแรงดันบัสไฟฟ้าอ้างอิง ($V_{bus,ref}$) หรืออาจจะกล่าวได้ว่า การควบคุมการผลิตกำลังไฟฟ้าของอัลเทอร์เนเตอร์เกิดขึ้นเนื่องจากการคุมค่ากระแสของอัลเทอร์เนเตอร์ ส่วนแรงดันบัสไฟฟ้าจะถูกควบคุมด้วยตัวคุมค่าแรงดันของอัลเทอร์เนเตอร์เพื่อไม่ให้เกินกว่าแรงดันไฟฟ้าที่กำหนด แต่ไม่สามารถควบคุมการผลิตกำลังไฟฟ้าตามความต้องการของภาระได้

2. วงจร VCC สามารถควบคุมกระแสไหลเข้าแบตเตอรี่ให้เป็นศูนย์ได้ในกรณีที่ไม่ต้องการให้มีการประจุไฟเข้าแบตเตอรี่ และสามารถควบคุมกระแสไหลเข้าแบตเตอรี่ให้เป็นค่าคงที่ได้ เมื่อต้องการให้มีการประจุไฟเข้าแบตเตอรี่อย่างต่อเนื่อง

3. การทำงานของวงจร VCC จะพิจารณาให้อัลเทอร์เนเตอร์เป็นแหล่งจ่ายพลังงานหลัก (Main source) คือ พยายามให้อัลเทอร์เนเตอร์จ่ายพลังงานให้กับภาระก่อนเป็นแหล่งพลังงานอันดับแรก ถ้าความต้องการของภาระเกินค่าพิกัดของอัลเทอร์เนเตอร์แล้ว ถึงจะให้แบตเตอรี่จ่ายพลังงานในส่วนที่ไม่เพียงพอ ซึ่งแสดงว่า แหล่งพลังงานแบตเตอรี่เป็นแหล่งพลังงานสำรอง (Backup source) ตามหลักการพื้นฐานระบบประจุไฟ หากสามารถควบคุมการผลิตกำลังไฟฟ้าของอัลเทอร์เนเตอร์ให้แปรค่าตามกระแสขดลวดสนามโรเตอร์หรือกระแสฟิลด์ในช่วงที่กว้างได้ จะเป็นผลให้สามารถควบคุมพลังงานจากแบตเตอรี่สำรองได้เช่นกัน ยกตัวอย่างเช่น ในสภาวะความต้องการกำลังไฟฟ้าน้อยและแบตเตอรี่มีพลังงานสำรองที่ต่ำ ซึ่งสามารถบังคับให้อัลเทอร์เนเตอร์ผลิตได้กำลังไฟฟ้าเพื่อตอบสนอง

กับระบบประจุไฟแบตเตอรี่ แนวคิดดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงการใช้งานของระบบอัลเทอร์เนเตอร์อย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อให้เกิดประสิทธิผลสูงสุด

4. วงจร VCC สามารถควบคุมการผลิตกำลังไฟฟ้าของอัลเทอร์เนเตอร์ การอัดและคายประจุของแบตเตอรี่ และมีการจัดลำดับความสำคัญของแหล่งพลังงานโดยพิจารณาการผลิตกำลังไฟฟ้าของอัลเทอร์เนเตอร์ให้เป็นไปตามที่ภาระต้องการได้ จึงอาจกล่าวได้ว่า ระบบคุมค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าของอัลเทอร์เนเตอร์สามารถจัดการด้านพลังงานเบื้องต้นได้

5. ระบบคุมค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าของอัลเทอร์เนเตอร์ให้ผลการตอบสนองที่ดีกว่า เนื่องจาก วงจร VCC ควบคุมการเปิด-ปิดตามความต้องการกระแสไฟฟ้าของภาระโดยตรง

5.1 วิจารณ์ผลการทดสอบ

งานวิจัยนี้ได้ทดสอบแบบจำลองการทำงานอัลเทอร์เนเตอร์เพื่อเปรียบเทียบกับผลการวัดจริงในระบบอัลเทอร์เนเตอร์บนโปรแกรม Matlab โดยพิจารณาเลือกใช้ความเหนี่ยวนำซิงโครนัสเฉลี่ยที่แปรผันตามกระแสฟิลด์แทนการใช้ความเหนี่ยวนำซิงโครนัสแบบเป็นค่าคงที่ ทำให้สามารถทำนายกำลังไฟฟ้าอัลเทอร์เนเตอร์ได้ในช่วงที่กว้างขึ้นครอบคลุมช่วงการใช้งานจริงของอัลเทอร์เนเตอร์แบบลันเดลล์ กำลังไฟฟ้าอัลเทอร์เนเตอร์ที่ได้มีผลคลาดเคลื่อนไม่เกิน 5% ในช่วงกระแสฟิลด์ 0-4 แอมป์ แต่วิธีการนี้มีความซับซ้อนและยุ่งยากกว่า เพราะต้องมีการทดสอบเปิดวงจรและการทดสอบลัดวงจรอัลเทอร์เนเตอร์ เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการค้นหาค่าความเหนี่ยวนำ (Lookup table) ประกอบกับต้องทำการประมาณค่านอกช่วงการทดสอบ (Extrapolation) ของข้อมูลที่มีอยู่ เนื่องจากการทดสอบแบบลัดวงจรมีข้อจำกัดทางด้านพิกัดไฟฟ้า ถึงจะได้ค่าความเหนี่ยวนำที่สัมพันธ์กับความเร็วรอบของอัลเทอร์เนเตอร์และกระแสฟิลด์ จากนั้นจึงนำมาหาค่าเฉลี่ยเพื่อสร้างตัวแทนของกลุ่มข้อมูลสำหรับทำนายค่ากำลังไฟฟ้าอัลเทอร์เนเตอร์แบบลันเดลล์

ผลทดสอบการทำงานของวงจร VCC ที่มีต่อกระแสประจุไฟเข้าแบตเตอรี่ แสดงให้เห็นถึงผลการควบคุมกำลังไฟฟ้าอัลเทอร์เนเตอร์ในกรณีที่กระแสประจุไฟแบตเตอรี่มีค่าเท่ากับ 0 และ 5 แอมป์ ซึ่งการพิจารณาในกรณีที่กระแสประจุไฟเข้าแบตเตอรี่เป็นศูนย์ จะยังไม่เห็นเด่นชัดในการใช้งานของระบบปัจจุบัน เนื่องจากแนวคิดด้านการจัดการแหล่งจ่ายพลังงานยังคงให้แบตเตอรี่เป็นแหล่งพลังงานหลัก ซึ่งสามารถตอบสนองต่อระบบได้รวดเร็ว ส่วนกำลังไฟฟ้าที่ได้จากอัลเทอร์เนเตอร์นำไปใช้ประโยชน์กับระบบประจุไฟเพื่ออัดประจุให้กับแบตเตอรี่ ดังนั้น ในภาวะที่อัลเทอร์เนเตอร์สามารถ

ผลิตกำลังไฟฟ้าได้มาก อัลเทอร์เนเตอร์จะผลิตออกมามากที่สุดเพื่อให้แบตเตอรี่เก็บพลังงานไว้ ซึ่งหากมองในเรื่องเสถียรภาพจะถือว่าเป็นผลดีมีพลังงานสำรองไว้ใช้งาน แต่สำหรับในเรื่องประสิทธิภาพการใช้งานแล้ว ถือว่ามีการสูญเสียเกิดขึ้นในระบบตลอดเวลา เนื่องจากอัลเทอร์เนเตอร์จะผลิตกำลังไฟฟ้าออกมาในปริมาณที่มากตลอดเวลา ซึ่งเกี่ยวข้องกับแรงดันบัสไฟฟ้าอ้างอิง เพราะการกำหนดให้แรงดันบัสไฟฟ้าอ้างอิงสูงสุดอยู่ที่ค่าหนึ่ง (อย่างเช่นระบบปัจจุบัน แรงดันบัสไฟฟ้าอ้างอิงเท่ากับ 14.2 ±0.2 V) ก็เท่ากับว่าได้กำหนดค่ากำลังไฟฟ้าไว้ที่ค่าหนึ่งแล้วตามสมการมุมกำลังไฟฟ้า (Power angle equation) ผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าอัลเทอร์เนเตอร์ที่ภาระ 160 วัตต์ (หลอดไฟรถยนต์ 2 หลอด) จึงเห็นได้ชัดว่า การใช้งานของภาระมีไม่ถึง 50 % ของกำลังไฟฟ้าที่อัลเทอร์เนเตอร์สามารถผลิตได้ ซึ่งส่วนต่างของกำลังไฟฟ้าที่ปรากฏ ถ้ามีระบบการจัดการพลังงานที่ดี สามารถประหยัดพลังงานเชื้อเพลิงในรถยนต์ได้

ผลทดสอบการทำงานของวงจร VCC ที่มีต่อกระแสภาระ แสดงให้เห็นว่า วงจร VCC ที่นำเสนอสามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าได้ตามความต้องการของภาระได้ โดยที่กระแสฟิลด์กับความเร็วรอบอัลเทอร์เนเตอร์มีความสัมพันธ์กันแบบไม่เป็นเชิงเส้น แต่มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน เช่นเดียวกันกับความสัมพันธ์ของกระแสฟิลด์กับกระแสอัลเทอร์เนเตอร์ แต่ความสัมพันธ์ลักษณะนี้มีความเป็นเชิงเส้นมากขึ้นเมื่อความเร็วรอบอัลเทอร์เนเตอร์เพิ่มสูงขึ้น

5.2 ข้อจำกัดของงานวิจัย

1 ระบบอัลเทอร์เนเตอร์ที่พัฒนาขึ้น มีข้อจำกัดในส่วนการกำหนดกระแสประจุไฟเข้าแบตเตอรี่แบบอัตโนมัติ เพื่อควบคุมให้อัลเทอร์เนเตอร์แบบลันเดลล์ทำงานในตำแหน่งค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) ตามความต้องการกำลังไฟฟ้าของภาระ ซึ่งต้องอาศัยการจัดการพลังงานในแบตเตอรี่เข้ามาเกี่ยวข้อง เพื่อกำหนดให้กระแสไหลเข้าแบตเตอรี่เท่าไรจึงเหมาะสม

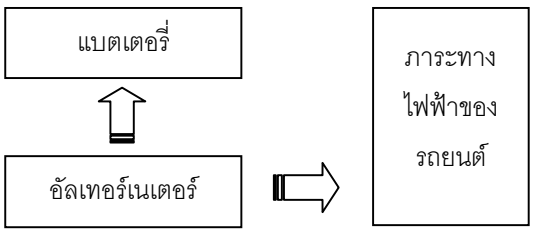
2 ระบบอัลเทอร์เนเตอร์ที่พัฒนาขึ้น ยังคงมีผลในเรื่องความไม่เป็นเชิงเส้นของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าควบคุม เพื่อเป็นไฟเลี้ยงสำหรับตัวเซ็นเซอร์กระแสและตั้งค่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงของวงจร VCC

3 ระบบอัลเทอร์เนเตอร์ที่พัฒนาขึ้นโดยใช้วงจร VCC ในการควบคุมกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของอัลเทอร์เนเตอร์ มีข้อจำกัดในส่วนที่เกี่ยวข้องกับเรื่องการบ่งบอกสถานะการประจุไฟของแบตเตอรี่

5.3 การประยุกต์ใช้งานกับระบบรถยนต์

งานวิจัยนี้นำเสนอแนวทางการควบคุมกำลังไฟฟ้าอัลเทอร์เนเตอร์ ด้วยวงจรต้นแบบ VCC เพื่อประยุกต์ใช้สำหรับการประจุไฟฟ้าในรถยนต์นั่งทั่วไป และประโยชน์ด้านจัดการพลังงานของระบบรถยนต์ ซึ่งมีลักษณะคล้ายคลึงกับการจัดพลังงานไฟฟ้าของระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า (electric power distribution system) โดยระบบจัดการพลังงานไฟฟ้า (electric power management system) จะพิจารณาถึงปริมาณกำลังไฟฟ้าที่แหล่งกำเนิดไฟฟ้าสามารถผลิตได้ประกอบกับพลังงานไฟฟ้าในแบตเตอรี่และปริมาณของภาระงานทางไฟฟ้าที่อุปกรณ์ต่างๆ ของรถยนต์

การควบคุมให้อัลเทอร์เนเตอร์ทำงานตามภาระงานทางไฟฟ้าโดยอาศัยการแปรค่ากระแสขดลวดสนามโรเตอร์ ส่งผลดีกับระบบประจุไฟฟ้าโดยรวม เนื่องจากการทำงานของระบบจะพิจารณาให้อัลเทอร์เนเตอร์เป็นแหล่งจ่ายพลังงานหลัก (Major Source) คือ ให้อัลเทอร์เนเตอร์จ่ายพลังงานให้กับภาระก่อนเป็นอันดับแรก ถ้าความต้องการของภาระเกินค่าพิกัดของอัลเทอร์เนเตอร์แล้วถึงจะให้แบตเตอรี่จ่ายพลังงานในส่วนที่ไม่เพียงพอ ซึ่งแสดงว่า แหล่งพลังงานแบตเตอรี่เป็นแหล่งพลังงานสำรอง (Backup Source) อย่างแท้จริง ดังที่แสดงรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 การแบ่งจ่ายพลังงานของระบบอัลเทอร์เนเตอร์

การควบคุมการผลิตของอัลเทอร์เนเตอร์ตามความต้องการกำลังไฟฟ้าด้วยเทคนิคทางอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ส่งผลให้สามารถควบคุมพลังงานสำรองในแบตเตอรี่ได้เช่นกัน ยกตัวอย่างเช่น ในสภาวะความต้องการกำลังไฟฟ้าน้อยและแบตเตอรี่มีพลังงานสำรองที่สูง ระบบก็จะสามารถบังคับให้อัลเทอร์เนเตอร์ผลิตกำลังไฟฟ้าให้น้อยลงได้ เพื่อให้เพียงพอเฉพาะความต้องการของภาระเท่านั้น ทั้งนี้ เพื่อป้องกันการอัดประจุเข้าแบตเตอรี่มากเกินไป (Overcharge) การอัดประจุเข้าแบตเตอรี่มากเกินไป นอกจากจะเป็นการใช้พลังงานอย่างสูญเปล่าแล้ว ทำให้อายุการใช้งานของแบตเตอรี่สั้นลงอีกด้วย นอกจากนี้ ถ้าสามารถที่จะควบคุมการผลิตกำลังไฟฟ้าตามความต้องการของภาระได้แล้ว ก็จะ

สามารถควบคุมให้กระแสอัดประจุเข้าแบตเตอรี่เป็นค่าคงที่ (หรือตามรูปแบบที่ต้องการ) ได้ ถึงแม้จะเกิดการเปลี่ยนแปลงสภาวะของภาระงานทางไฟฟ้าก็ตาม ส่งผลให้สามารถอัดประจุแบตเตอรี่ได้อย่างเหมาะสม เช่น สามารถอัดประจุแบตเตอรี่จนเต็มในเวลาอันรวดเร็ว หรือยืดอายุการใช้งานแบตเตอรี่ แนวคิดดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงการจัดการกำลังไฟฟ้า เพื่อให้ระบบกำลังไฟฟ้าทำงานร่วมกันได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด ในการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ที่จะนำแนวคิดการควบคุมกำลังไฟฟ้าตามความต้องการของภาระและวงจรต้นแบบที่จะนำมาประยุกต์ใช้กับระบบรถยนต์นั่งทั่วไป จะอ้างอิงเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาระบบกำลังไฟฟ้า การจัดการด้านพลังงานของแบตเตอรี่และในรถยนต์ เพื่อสร้างวิธีการที่เพียงพอสำหรับอัดประจุไฟแบตเตอรี่ ในที่นี้จะขอยกตัวอย่างการประยุกต์ใช้งาน ของวงจร VCC เป็น 2 กรณีหลัก ตามความสามารถของวงจร ดังต่อไปนี้

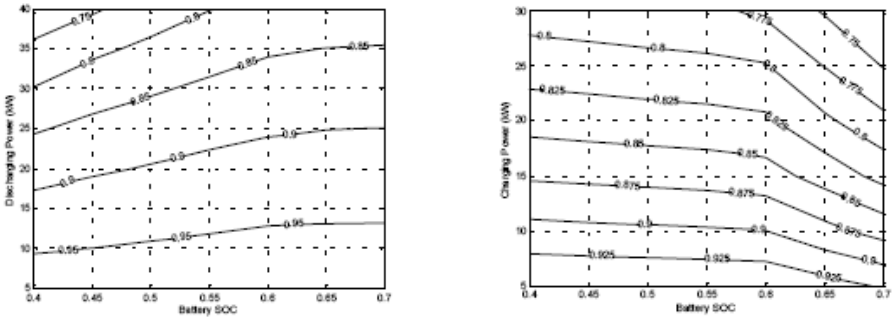
1. การทดสอบวงจรควบคุมแรงดันบัสและกระแสไฟฟ้าอัลเทอร์เนเตอร์ (Voltage and Current Controller: VCC) จะเห็นว่าสามารถควบคุมกระแสอัดประจุของแบตเตอรี่ ให้คงที่ได้ ($I_{bat,charge} = constant$) เช่นเดียวกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบของการอัดประจุแบตเตอรี่กรดตะกั่วอย่างเร็ว (Fast charging lead acid) การอัดประจุอย่างยิ่งยวดได้ถูกนิยามโดยกลุ่มสมาคมแบตเตอรี่กรดตะกั่วชั้นสูง (Advance lead acid consortium: ALABC) ว่ามีลักษณะดังต่อไปนี้ [23]

- สามารถอัดประจุไฟแบตเตอรี่ให้เต็มภายใน 4 ชั่วโมง
- สามารถอัดประจุไฟแบตเตอรี่ให้มีค่าพลังงานอยู่ที่ 80 % ของความจุปกติ ภายในเวลาไม่เกิน 15 นาที
- และ/หรือ สามารถอัดประจุไฟแบตเตอรี่ให้อยู่ที่ 50 % ภายในเวลาไม่เกิน 5 นาที

ในงานวิจัยนี้ได้ทดสอบการอัดประจุไฟเข้าแบตเตอรี่ที่ต่างชนิดกัน เพื่อแสดงให้เห็นว่าแบตเตอรี่ต่างชนิดกันมีความจำเป็นที่จะต้องให้กระแสอัดประจุที่ต่างกันสำหรับใช้ในการอัดประจุแบตเตอรี่อย่างยิ่งยวด สอดคล้องกับการทำงานของวงจร VCC ที่สามารถกำหนดกระแสอัดประจุแบตเตอรี่ได้ภายในเวลาที่จำกัด เพื่อประโยชน์ในการเลือกเครื่องอัดประจุ (Battery charger) ให้เหมาะสมกับรถยนต์ไฟฟ้า (Electric vehicle)

2. ความสามารถของวงจร VCC ในการกำหนดให้ไม่มีกระแสไหลเข้าแบตเตอรี่ได้ ($I_{bat,charge} = 0$) ในกรณีที่ต้องการทำการอัดประจุไฟเข้าแบตเตอรี่ให้เกิดประสิทธิภาพการใช้งาน ยกตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานกรณีศึกษาด้านการจัดการกำลังไฟฟ้าของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับรถ

ขับเคลื่อนไฟฟ้าร่วม (HEV) [24] ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาอัลกอริธึมด้านการจัดการพลังงานของรถยนต์ โดยได้เสนอ อัลกอริธึมที่เกี่ยวกับกฎพื้นฐาน (Rule Based Algorithm) และอัลกอริธึมที่เกี่ยวข้องกับกำหนดค่าที่เหมาะสมแบบพลศาสตร์ (Dynamic programming based algorithm) ซึ่งอัลกอริธึมที่กำหนดกฎ จะเกี่ยวข้องการวิเคราะห์ค่าประสิทธิภาพขององค์ประกอบที่เป็นแบบตารางหรือแผนผัง ตัวอย่างเช่น แผนที่ประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ชนิดกรดตะกั่วในกรณีที่อัดประจุและคายประจุ ดังแสดงในรูปที่ 5.2

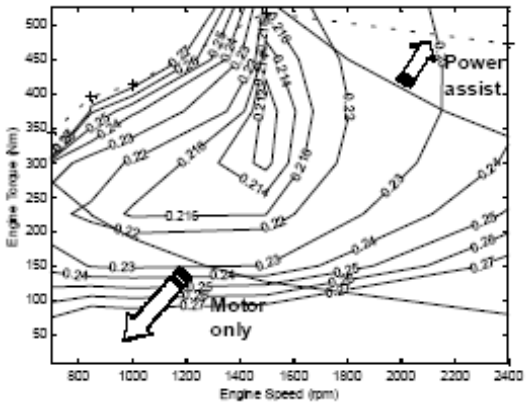


(ก) (ข)

รูปที่ 5.2 แผนที่ประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ชนิดกรดตะกั่ว

(ก) กรณีแบตเตอรี่ถูกอัดประจุ (ข) กรณีแบตเตอรี่ถูกอัดประจุ

การจัดการกำลังไฟฟ้าแบบกำหนดกฎ จะแบ่งการทำงานเป็น 3 ลักษณะ คือ การทำงานในสภาวะปกติ การทำงานในลักษณะการอัดประจุและการทำงานในลักษณะการเบรก โดยอาศัยแผนที่ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ในการกำหนดกฎการจัดการด้านกำลังไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 การจัดการด้านกำลังไฟฟ้าโดยกำหนดกฎ

5.3.1 การทำงานในสภาวะปกติ (Normal mode)

การกำหนดค่ากำลังไฟฟ้าเริ่มต้นจากสัญญาณการเหยียบคันเร่งของคนขับ (P_{req}) ซึ่งถือว่าเป็นความต้องการกำลังไฟฟ้า การทำงานในสภาวะปกติจะมีแหล่งจ่ายกำลังของเครื่องยนต์ (P_{e_on}) และกำลังไฟฟ้าช่วยจากมอเตอร์ (P_{m_a}) ถ้าความต้องการกำลังไฟฟ้าสุทธิ (Total power request) น้อยกว่าระดับค่ากำลังไฟฟ้าของเครื่องยนต์ มอเตอร์ไฟฟ้าจะเป็นตัวจ่ายกำลังไฟฟ้าให้ หากความต้องการกำลังไฟฟ้าเพิ่มมากเกินกว่าค่าหนึ่งที่เครื่องยนต์สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ เครื่องยนต์จะจ่ายกำลังไฟฟ้าแทนมอเตอร์ไฟฟ้า มอเตอร์ไฟฟ้าจะจ่ายกำลังไฟฟ้าส่วนที่เหลือ ($P_{req} - P_{m_a}$) ทำให้การทำงานในสภาวะปกติ เครื่องยนต์สามารถทำงานในแถบบริเวณที่มีประสิทธิภาพสูงตลอดเวลา ที่อยู่ระหว่างเส้นกำลังไฟฟ้า (P_{e_on}) กับ (P_{m_a}) บนแผนที่ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์

5.3.2 การทำงานในลักษณะการอัดประจุ (Charging mode)

วิธีการกำหนดให้มีการอัดประจุแบตเตอรี่ โดยอาศัยขอบเขตสูงกว่าหรือต่ำกว่าของสภาวะการทำงานของแบตเตอรี่ (SOC) ตัวอย่างเช่น SOC ที่ 55-60 % เป็นช่วงสภาวะการทำงานของแบตเตอรี่ที่ทำให้เกิดประสิทธิ เมื่อ SOC ลดลงต่ำกว่าขีดจำกัดล่าง SOC_{min} ตัวควบคุมจะควบคุมให้มีการอัดประจุเข้าแบตเตอรี่ ($Flag_{ch} = True$) ค่ากำลังไฟฟ้าสำหรับอัดประจุแบตเตอรี่ (P_{ch}) จะบวกเพิ่มเข้าไปกับความต้องการกำลังไฟฟ้าสุทธิ และตัวควบคุมจะหยุดการอัดประจุให้กับแบตเตอรี่ เมื่อ SOC สูงกว่าค่าขีดจำกัดบน SOC_{max} ที่ 60 %

5.3.3 การทำงานในลักษณะการเบรก (Braking mode)

เมื่อคนขับแตะเบรก สามารถอธิบายได้ด้วยค่ากำลังไฟฟ้าสุทธิแบบลบ ($P_{req} < 0$) การเบรกแบบอนุรักษ์พลังงาน (Regenerative Braking) จะมีการกักเก็บพลังงานเอาไว้ตรรกะของอัลกอริธึมที่เกี่ยวกับการกำหนดกฎ ในงานวิจัยนี้ สามารถสรุปได้เป็น

$$IF \quad SOC < SOC_{min}$$
$$Flag_{ch} = True, P_{tot} = P_{req} + P_{ch}$$
$$IF \quad SOC > SOC_{max}$$
$$Flag_{ch} = False, P_{tot} = P_{req}$$

การประยุกต์ใช้งานของวงจรต้นแบบ VCC มีความสามารถเช่นเดียวกับงานวิจัยข้างต้น แสดงให้เห็นความสามารถในด้านการจัดการพลังงาน เพียงแต่ต้องอาศัยข้อมูลสถานะของแบตเตอรี่ที่บ่งชี้ถึงปริมาณพลังงานที่คงเหลือในระบบจากการวัดที่ถูกต้องแม่นยำ แผนที่ประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ชนิดกรดตะกั่ว แผนที่ประสิทธิภาพของมอเตอร์ และแผนที่ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ เพื่อประมวลผลและกำหนดกระแสอัดประจุให้กับแบตเตอรี่ ($I_{bat,charge}$) ซึ่งเป็นไปดังสมการที่ (3.5)

5.4 แนวทางพัฒนาและงานวิจัยต่อเนื่อง

การพัฒนาระบบอัลเทอร์เนเตอร์โดยใช้วงจร VCC สามารถทำให้เป็นการควบคุมด้วยไมโครคอนโทรเลอร์ซึ่งง่ายต่อการตั้งค่าพารามิเตอร์ และรองรับสัญญาณจากระบบอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น ระบบเฝ้าตรวจแบตเตอรี่ (Battery Monitoring System) ทำหน้าที่เฝ้าตรวจสถานะของประจุ หรือ SOC (state of charge) และสถานะของสภาพแบตเตอรี่ หรือ SOH (State of Health) ข้อมูลสถานะของแบตเตอรี่จากการวัดที่ถูกต้องแม่นยำจะถูกป้อนเข้าสู่ระบบการจัดการพลังงาน เพื่อประมวลผลและให้คำสั่งที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพอย่างสูงสุด

การพัฒนาระบบอัลเทอร์เนเตอร์แบบลันเดลล์โดยใช้วงจร VCC ร่วมกับวงจรเรียงกระแสแบบสวิตช์โหมด (Switched-Mode Rectifier) เพื่อให้สามารถจ่ายกำลังเอาต์พุตได้สูงสุด ที่ทุกความเร็วรอบเครื่องยนต์ สามารถให้เอาต์พุตเฉลี่ยสูงถึง 2.5 กิโลวัตต์ ที่แรงดันระดับ 42 โวลต์ (จากเดิม 1.3 กิโลวัตต์ ที่ 14 โวลต์) หรือทำงานร่วมกับวงจรคอนเวอร์เตอร์ (Converter) DC/DC ซึ่งเป็นแหล่งจ่ายกำลังที่ทำงานด้วยหลักการสวิตช์ (Switching Power Supply) ทำหน้าที่คุมค่าระดับแรงดันให้อยู่ในช่วงค่าเบี่ยงเบนแรงดัน (voltage tolerance) ที่กำหนด เพื่อป้องกันความเสียหายของระบบย่อยจากแรงดันตกหรือแรงดันเกิน