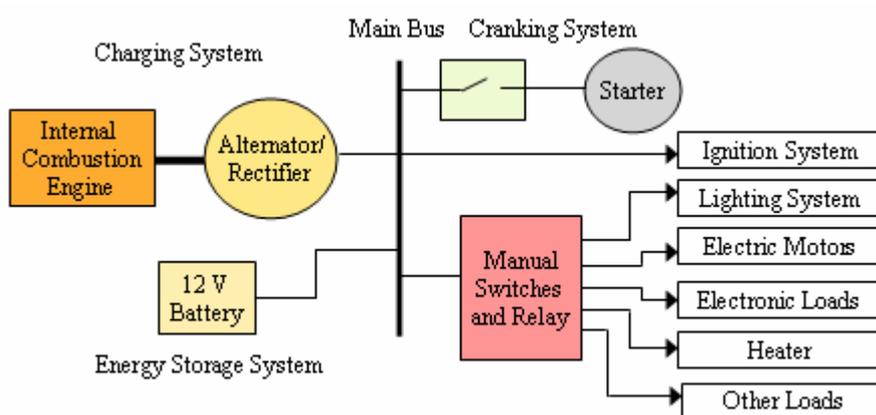


บทที่ 2

แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงรายละเอียดของการศึกษาค้นคว้าแนวความคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย หลักการทำงานและวิเคราะห์พฤติกรรมทางไฟฟ้าของระบบอัลเทอร์เนเตอร์ที่สัมพันธ์กับความเร็วยรอบของเครื่องยนต์และกระแสขดลวดสนามแม่เหล็กหรือกระแสฟิลด์ (Field current) แสดงองค์ประกอบและการทำงานของระบบประจุไฟฟ้า (Charging System) การวิเคราะห์ห้วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบภาระแรงดันไฟฟ้าคงที่ (Constant load voltage) การวิเคราะห์ค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตอัลเทอร์เนเตอร์ การสร้างแบบจำลองระบบอัลเทอร์เนเตอร์เพื่อทำนายค่ากำลังไฟฟ้าอัลเทอร์เนเตอร์

2.1 ระบบไฟฟ้าที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน



รูปที่ 2.1 โครงสร้างระบบไฟฟ้ารถยนต์ในปัจจุบัน

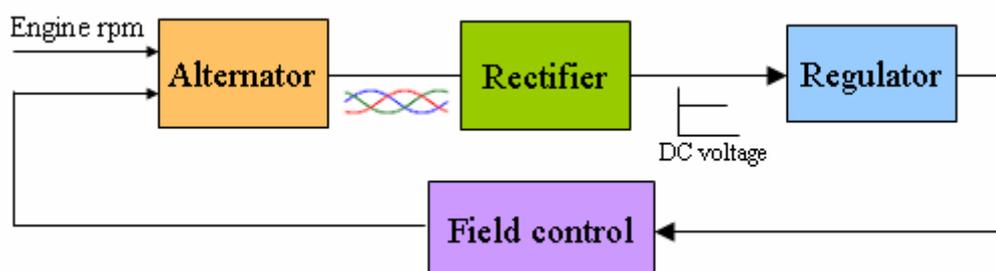
ความต้องการกำลังไฟฟ้าของรถยนต์ในปัจจุบัน ส่วนใหญ่เกิดจากระบบสตาร์ท ระบบไฟแสงสว่าง และระบบจุดระเบิด ภาระทางไฟฟ้าประเภทนี้ ต่อไปนี้ จะขอเรียกโดยรวมว่า ภาระประเภท SLI (Starting-Lighting-Ignition) ซึ่งหมายรวมถึง (ถ้ามี) ระบบอำนวยความสะดวก (อาทิเช่น ระบบกระจกไฟฟ้า ระบบล็อกประตูอัตโนมัติ) ระบบความปลอดภัย (อาทิเช่น ระบบเบรก ABS) และระบบควบคุมด้วยอิเล็กทรอนิกส์ (อาทิเช่น ระบบเกียร์อัตโนมัติ ระบบฉีดเชื้อเพลิง) โดยความต้องการไฟฟ้าในรถยนต์ขนาดเล็กอยู่ที่ประมาณ 600 วัตต์ ค่ากระแส 45แอมป์ ที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 12 โวลต์ [15] ส่วนแบตเตอรี่เป็นแหล่งพลังงานหลักซึ่งมีค่าเฉลี่ยกำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 1-2

กิโลวัตต์ ทำหน้าที่จ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับระบบจุดระเบิดสำหรับหมุนข้อเหวี่ยงของเครื่องยนต์ จากนั้นเครื่องยนต์เองก็จะขับอัลเทอร์เนเตอร์ผ่านทางสายพานเพื่ออัดประจุไฟฟ้าให้กับแบตเตอรี่ โครงสร้างระบบไฟฟ้ารถยนต์ปัจจุบันของระบบไฟฟ้ารถยนต์ 14 โวลต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 เป็นระบบแรงดันไฟฟ้าเดี่ยวที่มีการควบคุมภาวะด้วยการเปิด-ปิดสวิตช์และรีเลย์ ภาวะทั้งหมดจะเชื่อมต่อกันโดยตรงที่ขั้วแบตเตอรี่ ทั้งที่ความเป็นจริงแล้ว ภาวะไม่ได้ใช้งานพร้อมกันทีเดียว เพียงแต่ระบบได้ถูกออกแบบมาเพื่อสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาวะทั้งหมดได้ในเวลาเดียวกัน แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่มีการเปลี่ยนแปลง ขึ้นอยู่กับสถานะของการประจุ (State of Charge: SOC) อายุการใช้งานแบตเตอรี่ และกระแสอัลเทอร์เนเตอร์

2.2 ระบบประจุไฟในรถยนต์

ระบบประจุไฟฟ้าในรถยนต์ทำหน้าที่จ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับแบตเตอรี่ให้มีพลังงานเต็มอยู่ตลอดเวลาสำหรับจ่ายพลังงานได้ทันทีเมื่อภาวะต้องการ และวงจรไฟฟ้าต่างๆ ในรถยนต์ ขณะเดียวกันก็ต้องมีการควบคุมการอัดประจุไฟแบตเตอรี่ให้อยู่ในช่วงค่าที่กำหนด เพื่อไม่ให้เกิดการอัดประจุไฟที่มากเกินไป (Overcharge) ซึ่งจะก่อให้เกิดความเสียหายกับระบบประจุไฟฟ้าและอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ ในรถยนต์ได้

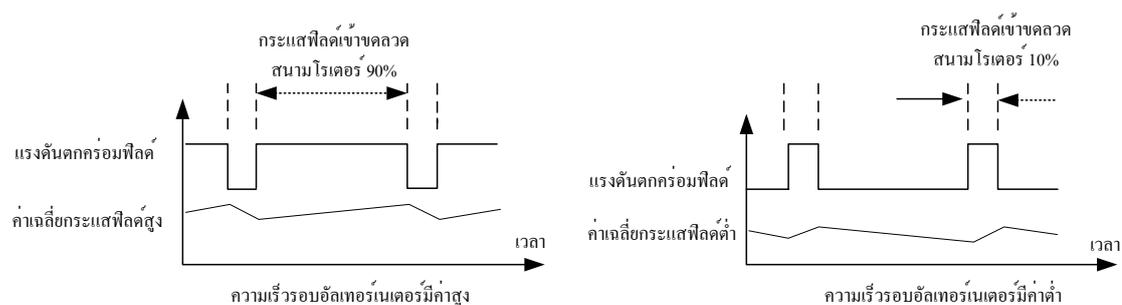
ระบบประจุไฟฟ้าของรถยนต์ในปัจจุบันโดยทั่วไป ประกอบด้วย อัลเทอร์เนเตอร์ (Alternator) วงจรเรียงกระแส (Rectifier) วงจรคุมค่าแรงดัน (Voltage Regulator) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 หลักการทำงานโดยสังเขป คือ อัลเทอร์เนเตอร์ทำหน้าที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส วงจรเรียงกระแสเต็มบริจด์ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสเป็นไฟฟ้ากระแสตรง และวงจรคุมค่าแรงดัน ต่อไปนี้ จะขอเรียกเป็นโวลต์เตจเรกูเลเตอร์ ทำหน้าที่รักษาระดับแรงดันบัลไฟฟ้า (Power Bus) ซึ่งก็คือแรงดันเอาต์พุตของอัลเทอร์เนเตอร์ เมื่อคุมค่าแรงดันเอาต์พุตของอัลเทอร์เนเตอร์ให้คงที่ กำลังไฟฟ้าที่อัลเทอร์เนเตอร์ผลิตได้ก็จะแปรผันตามปริมาณกระแสเอาต์พุตอัลเทอร์เนเตอร์



รูปที่ 2.2 แผนผังวิธีการคุมค่ากระแสผลิตของระบบประจุไฟฟ้าในรถยนต์ทั่วไป

2.2.1 อัลเทอร์เนเตอร์

อัลเทอร์เนเตอร์แบบลันเดลล์ (Lundell Alternator) เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัส (Synchronous Generator) ที่ประกอบด้วยขดลวดสเตเตอร์สามเฟส และขดลวดสนาม (field winding) บนแกนโรเตอร์ที่ถูกกระตุ้นผ่านวงแหวนสลลิป (Slip Ring) โดยทั่วไป ลักษณะของอัลเทอร์เนเตอร์จะมีทั้งวงจรเรียงกระแสและโวลต์เตจเรกูเลเตอร์ประกอบรวมมาด้วยในฝาครอบ เมื่อเกิดการกระเพื่อมที่แรงดันเอาต์พุตของอัลเทอร์เนเตอร์ จากการเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วรอบเครื่องยนต์ตามสภาวะการขับซี โวลต์เตจเรกูเลเตอร์จะคอยปรับเพิ่มหรือลดแรงดันไฟฟ้าที่บัสกำลังให้อยู่ในช่วงค่า 14.2 ± 0.2 โวลต์ ตามที่ได้กำหนดไว้ โดยการควบคุมความเข้มสนามแม่เหล็กของขดลวดสนามโรเตอร์ (rotor field winding) ด้วยวิธีการเปิด-ปิด กระแสเข้าขดลวดสนามโรเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การควบคุมกระแสฟิลด์ด้วยวิธีการเปิด-ปิดกระแสเข้าขดลวดสนามโรเตอร์

2.2.2 วงจรเรียงกระแสและโวลต์เตจเรกูเลเตอร์

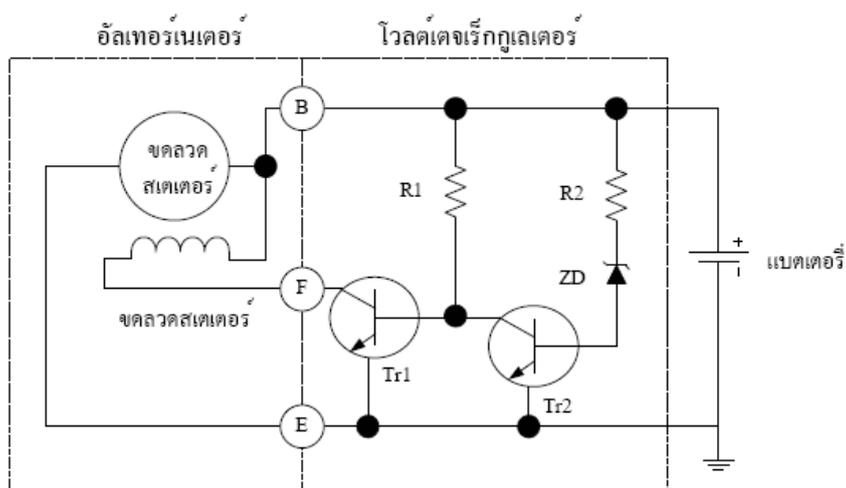
วงจรเรียงกระแสของรถยนต์ในปัจจุบัน เป็นวงจรเรียงกระแสแบบไดโอดเต็มบริดจ์ (Full-bridge Diode Rectifier) ประกอบด้วยวงจรเรียงกระแสแบบสตาร์สามเฟสหรือแบบครึ่งคลื่นสามเฟสสองชุด กระแสจะไหลผ่านภาวะจากวงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่นชุดบน และไหลกลับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสลับผ่านวงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่นชุดล่าง จึงทำให้กระแสที่ไหลในแหล่งจ่ายไฟฟ้ามีทั้งช่วงบวกและช่วงลบหรือเต็มคลื่น (Full wave) การนำวงจรเรียงกระแสไปใช้เพื่อแปลงไฟกระแสลับเป็นไฟกระแสตรงให้กับอัลเทอร์เนเตอร์ในรถยนต์ แต่ไม่สามารถทำการควบคุมกำลังไฟฟ้าได้

โวลต์เตจเรกูเลเตอร์ คือ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ควบคุมแรงดันที่บัสกำลังให้อยู่ช่วงค่าเบี่ยงเบนที่กำหนด ทั้งนี้เพื่อป้องกันไม่ให้แบตเตอรี่ อุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ ในรถยนต์ และระบบของอัลเทอร์เนเตอร์ได้รับความเสียหายได้ด้วยวิธีการเปิดปิด (ON-OFF) ของกระแสเข้าขดลวด

สนามโรเตอร์หรือกระแสฟลักซ์ เนื่องจากความเร็วรอบของอัลเทอร์เนเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงไปตามความเร็วรอบของเครื่องยนต์ อัลเทอร์เนเตอร์จะต้องรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าให้คงที่ โดยอาศัยโวลต์เตจเรกูเลเตอร์เป็นตัวควบคุมความเข้มสนามแม่เหล็กของขดลวดโรเตอร์ ด้วยการเพิ่มหรือลดกระแสไฟฟ้าที่เข้าไปยังขดลวดโรเตอร์

หลักการการทำงานทั่วไปของโวลต์เตจเรกูเลเตอร์ แสดงดังรูปที่ 2.4 กระแสไฟฟ้าจากแบตเตอรี่จะไหลไปยังขดลวดโรเตอร์ทางขั้ว B และออกจากขดลวดโรเตอร์ทางขั้ว F รอยอยู่ที่ขา collector ของทรานซิสเตอร์ Tr1 กระแสไฟฟ้าจากแบตเตอรี่อีกทางหนึ่งจะไหลผ่านความต้านทาน R1 ไปหา base ของทรานซิสเตอร์ Tr1 ไปขั้ว E ลงกราวด์ครบวงจร ทำให้กระแสไฟฟ้าจากขั้ว F ที่รอยอยู่ที่ขา collector ไหลผ่านไปยังขั้ว E ในอัตราขยาย 10 เท่า ทำให้ขดลวดโรเตอร์เกิดความเข้มของสนามแม่เหล็กมาก เมื่ออัลเทอร์เนเตอร์หมุนทำงานก็จะผลิตแรงดันไฟฟ้าออกมา

เมื่อแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว B ของอัลเทอร์เนเตอร์มีมากขึ้นจนถึงจุดที่ตัวซีเนอร์ไดโอดยอมให้แรงดันไฟฟ้าไหลผ่าน จะทำให้ทรานซิสเตอร์ Tr2 ทำงาน โดยแรงดันไฟฟ้าจะไหลผ่านตัวซีเนอร์ไดโอดและขา base ของทรานซิสเตอร์ Tr2 ผ่านไปยังขั้ว E ทำให้เกิดการดึงกระแสไฟฟ้าจากขา base ของทรานซิสเตอร์ Tr1 ไปยังขา collector ของทรานซิสเตอร์ Tr2 แล้วลงกราวด์ที่ขั้ว E ในอัตราขยาย 10 เท่า ทรานซิสเตอร์ Tr1 ก็จะหยุดทำงาน กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดโรเตอร์ไม่สามารถไหลครบวงจรได้ เป็นผลให้ขดลวดโรเตอร์ไม่เป็นแม่เหล็ก อัลเทอร์เนเตอร์ไม่สามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าออกมาได้



รูปที่ 2.4 หลักการทำงานทั่วไปของโวลต์เตจเรกูเลเตอร์

เมื่อแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว B ลดลงจนถึงจุดที่ซีเนอร์ไดโอดไม่ยอมให้แรงดันไฟฟ้าไหลผ่าน ทรานซิสเตอร์ Tr2 จะหยุดทำงาน ส่วนทรานซิสเตอร์ Tr1 จะทำงานแทน อัลเทอร์เนเตอร์จะผลิต

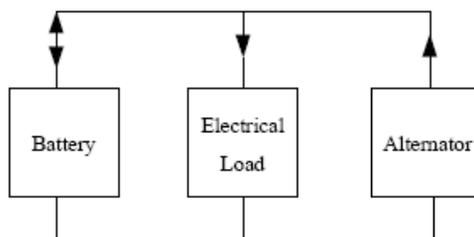
แรงดันไฟฟ้าอีกครั้ง วนเวียนอยู่เช่นนี้เพื่อควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ออกจากอัลเทอร์เนเตอร์ที่ 14.2 ± 0.2 โวลต์ ให้คงที่

2.2.3 แบตเตอรี่รถยนต์

แบตเตอรี่รถยนต์เป็นอุปกรณ์เคมีไฟฟ้าที่ใช้เก็บและจ่ายพลังงาน ความหมายของเคมีไฟฟ้าในที่นี้ คือ แบตเตอรี่จะใช้ทั้งพลังงานเคมีและพลังงานไฟฟ้าร่วมกันเพื่อนำไปใช้ผลิตไฟฟ้ากระแสตรงจำนวนมากมายมหาศาลตามขนาดแบตเตอรี่ โดยแบตเตอรี่จะจ่ายพลังงานไปยัง วงจรสตาร์ทเครื่องยนต์ วงจรจุดระเบิด วงจรไฟหน้า วงจรไฟเลี้ยง และอุปกรณ์ส่วนอื่นที่เกี่ยวข้อง เมื่อแบตเตอรี่มีประจุไฟฟ้าลดลง จึงจำเป็นต้องได้รับการประจุไฟฟ้าเข้าไปใหม่โดยถูกใช้เป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าคงที่จากเครื่องอัลเทอร์เนเตอร์ในรถยนต์ แบตเตอรี่ชนิดกรดตะกั่ว (Lead Acid Battery) มีการใช้งานทั่วไปในรถยนต์ขนาดเล็กถึงขนาดกลางในปัจจุบัน มีราคาต่ำ มีรอบการอัดคายประจุสั้น (Shallow Cycle) ให้กำลังระดับปานกลาง ตั้งแต่ 200 ถึง 400 วัตต์/กิโลกรัม แบตเตอรี่กรดตะกั่วโดยทั่วไป มีทั้งแบบเติมน้ำกลั่น และแบบไม่ต้องเติมน้ำกลั่นบ่อย (Maintenance-Free) บางครั้งเรียกว่าแบตเตอรี่ SL [16, 17, 18, 19] แหล่งพลังงานไฟฟ้าในรถยนต์ เป็นการทำงานร่วมกัน ของอุปกรณ์หลักๆ 2 ส่วนคือ แบตเตอรี่และอัลเทอร์เนเตอร์ ขณะรถยนต์หยุดนิ่ง พลังงานไฟฟ้าทั้งหมดจะจ่ายมาจากแบตเตอรี่ ซึ่งจะเป็นแรงเคลื่อนขนาด 12 โวลต์ แต่ถ้าขณะรถยนต์กำลังวิ่ง พลังงานไฟฟ้าจะจ่ายมาจากอัลเทอร์เนเตอร์ ซึ่งจะเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าขนาดประมาณ 14.2 ± 0.2 โวลต์ และพลังงานส่วนหนึ่ง ก็จะประจุไฟฟ้ากลับไปแบตเตอรี่

2.3 แบบจำลองระบบกำลังไฟฟ้ายานยนต์

แบบจำลองระบบกำลังไฟฟ้าได้สร้างขึ้นเพื่อจำลองการทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 2.5 โดยสามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วนด้วยกัน คือ แบตเตอรี่ อัลเทอร์เนเตอร์ และภาระไฟฟ้า ในแต่ละส่วนก็จะจำลองเป็นวงจรสมมูลทางไฟฟ้า [20]



รูปที่ 2.5 โครงสร้างกำลังไฟฟ้าในรถยนต์

2.3.1 แบบจำลองภาวะทางไฟฟ้า

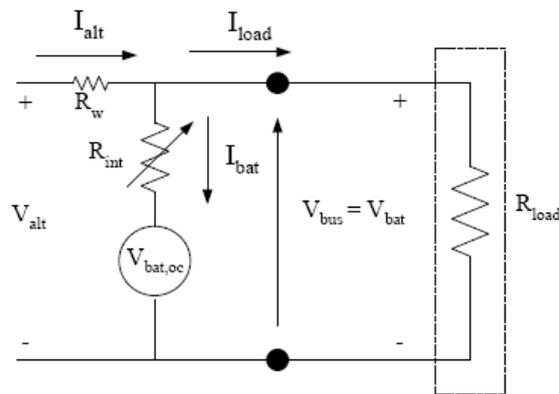
ความต้านทานสมมูลถูกจำลองให้เป็นภาวะทางไฟฟ้า ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามสถานะการเปิด-ปิดของภาวะ แต่วงจรสมมูลของอัลเทอร์เนเตอร์และแบตเตอรี่ไม่สามารถที่จะทำให้ง่ายได้ เนื่องจากมีคุณลักษณะที่ซับซ้อนทางไฟฟ้าและคุณสมบัติทางเคมี การสร้างแบบจำลองของอัลเทอร์เนเตอร์และแบตเตอรี่มีหลายวิธีด้วยกัน อย่างเช่น วิธีอาศัยข้อมูลจากผลการทดลองก็เป็นวิธีหนึ่งที่ย่างและมีความแม่นยำสูง

2.3.2 แบบจำลองแบตเตอรี่

แบตเตอรี่ในรถยนต์ทำหน้าที่เหมือนอุปกรณ์เก็บสารเคมีสำหรับผลิตพลังงานไฟฟ้า โดยสามารถที่จะให้กระแสได้สูงๆ ส่วนใหญ่ในรถยนต์ก็จะใช้แบตเตอรี่ชนิดกรดตะกั่ว คุณลักษณะของแบตเตอรี่ถูกกำหนดจากปฏิกิริยาทางเคมีภายใน และปฏิกิริยาที่เป็นผลมาจากอุณหภูมิรอบๆ (Temperature Ambient) สถานะการอัดประจุ (State of Charge: SOC) อัตราการอัดประจุ-คายประจุ (Charge-Discharge Rate) ดังนั้น จึงไม่ใช่เรื่องง่ายที่จะทำนายกระแสการอัดประจุ-คายประจุและการเปลี่ยนสถานะการอัดประจุของแบตเตอรี่ กระแสที่ไหลผ่านเข้าไปในแบตเตอรี่ คำนวณจากแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการประจุและอิมพีแดนซ์ภายในของแบตเตอรี่ กระแสอัดประจุและคายประจุ ซึ่งในการทดสอบของงานวิจัย สมมุติให้แบตเตอรี่ถูกอัดประจุที่แรงดันไฟฟ้าคงที่และคายประจุเกิดขึ้นระหว่างที่ภาวะคงที่

วิธีการสร้างแบบจำลองในงานวิจัยชิ้นนี้เลือกใช้แบบจำลองวงจรสมมูลทางไฟฟ้าแทนคุณสมบัติทางด้านเคมี ซึ่งแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด ($V_{bat,oc}$) ของแบตเตอรี่เป็นฟังก์ชันของสถานะการประจุแบตเตอรี่ (SOC) และความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ (R_{int}) เปลี่ยนแปลงตามสถานะการประจุไฟของแบตเตอรี่ที่เลียนแบบความต้านทานของปฏิกิริยาเคมี

วิเคราะห์แรงดันตกคร่อมระหว่างแรงดันบัสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าแบตเตอรี่ขณะเปิดวงจร ในกรณีที่อัดประจุเข้าและคายประจุออกของแบตเตอรี่ เมื่อพิจารณาวงจรสมมูลของแบตเตอรี่ที่ต่อกับภาวะทางไฟฟ้าของระบบอัลเทอร์เนเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แบบจำลองแบตเตอรี่

โดยที่

R_{int} = ความต้านทานภายในของแบตเตอรี่

R_{load} = ความต้านทานของภาระ

$V_{bat,oc}$ = แรงดันไฟฟ้าแบตเตอรี่ขณะที่เปิดวงจร

V_{alt} = แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตอัลเทอร์เนเตอร์

V_{bus} = แรงดันบัสไฟฟ้า

V_{bat} = แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่

I_{alt} = กระแสอัลเทอร์เนเตอร์

I_{load} = กระแสภาระ

I_{bat} = กระแสแบตเตอรี่

R_w = ความต้านทานของสายตัวนำ

ลักษณะการไหลของกระแสไฟฟ้าอัลเทอร์เนเตอร์ขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้าที่ตำแหน่งขั้วของอัลเทอร์เนเตอร์กับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่ สามารถแบ่งออกเป็น 3 กรณี

1. เมื่อแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของอัลเทอร์เนเตอร์น้อยกว่าแรงดันไฟฟ้าแบตเตอรี่ขณะที่เปิดวงจร กระแสอัลเทอร์เนเตอร์ที่ผลิตได้จะไหลไปที่ภาระเพียงอย่างเดียว ไม่ไหลย้อนกลับไปยังที่อัลเทอร์เนเตอร์ เนื่องจากมีการบล็อกของไดโอดเต็มบริจด์เรียงกระแส

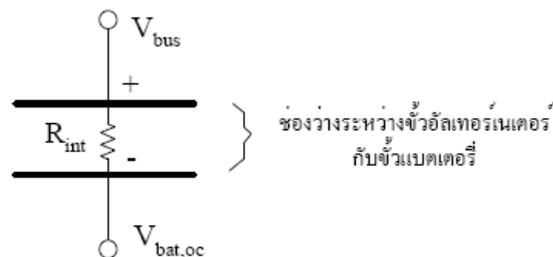
2. เมื่อแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วอัลเทอร์เนเตอร์เพิ่มสูงขึ้นจนมีขนาดเท่ากับแรงดันไฟฟ้าแบตเตอรี่ขณะที่เปิดวงจร กระแสของอัลเทอร์เนเตอร์จะไหลเข้าภาระแทนกระแสของแบตเตอรี่

3. เมื่อแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วอัลเทอร์เนเตอร์มีขนาดใหญ่กว่าแรงดันไฟฟ้าแบตเตอรี่ขณะที่เปิดวงจร กระแสของอัลเทอร์เนเตอร์จะไหลเข้าภาระและจะมีกระแสบางส่วนไหลเข้าแบตเตอรี่เพื่อทำการอัดประจุไฟให้กับแบตเตอรี่

$$V_{bus} = V_{bat,oc} \pm I_{bat} R_{int} \quad (2.1)$$

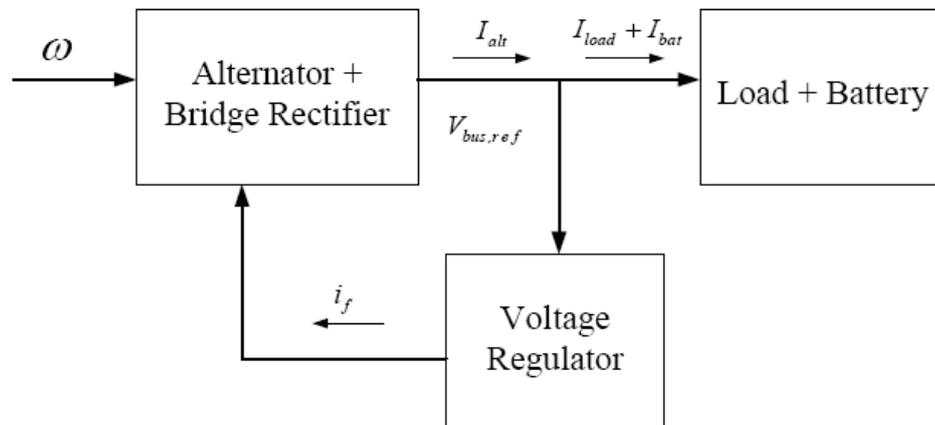
จากสมการ (2.1) จะเห็นว่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วอัลเทอร์เนเตอร์มีการเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับกระแสแบตเตอรี่ เป็นผลให้ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมความต้านทานภายในของ

แบตเตอรี่หรือที่เรียกว่า ผลต่างของแรงดันไฟฟ้าระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่ขณะเปิดวงจร ($V_{bat,oc}$) กับแรงดันบัสไฟฟ้า (V_{bus}) มีการเปลี่ยนแปลง ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ส่งผลต่อแรงดันไฟฟ้าที่บัสของอัลเทอร์เนเตอร์ เมื่อเกินค่าแรงดันบัสไฟฟ้าที่อ้างอิง ($V_{bus,ref}$) โวลต์เตจเร็กกูเลเตอร์จะทำหน้าที่ตัดกระแสฟิลต์ที่เป็นตัวกระตุ้นสนามแม่เหล็กในขดลวดโรเตอร์



รูปที่ 2.7 ผลต่างแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วอัลเทอร์เนเตอร์กับแรงดันแบตเตอรี่ขณะเปิดวงจร

อธิบายแรงดันไฟฟ้าของระบบอัลเทอร์เนเตอร์ ที่ประกอบไปด้วยแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของอัลเทอร์เนเตอร์และแรงดันที่ขั้วแบตเตอรี่ขณะที่ยังไม่มีภาระมาต่อ โดยแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของอัลเทอร์เนเตอร์ที่ความเร็วรอบอัลเทอร์เนเตอร์เริ่มต้นให้ค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำๆ เมื่อมีกระแสฟิลต์ไหลผ่านขดลวดสนามโรเตอร์และความเร็วรอบอัลเทอร์เนเตอร์เพิ่มสูงขึ้น ทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของอัลเทอร์เนเตอร์มีขนาดใหญ่ขึ้นจนมีขนาดเท่ากับแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมภาระ กระแสไฟฟ้าของอัลเทอร์เนเตอร์จะจ่ายไปที่ภาระทั้งหมดแทนการจ่ายของกระแสแบตเตอรี่ ทำให้ไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลเข้าหรือออกจากแบตเตอรี่ ($I_{bat} = 0$) ขณะนี้แรงดันที่ขั้วอัลเทอร์เนเตอร์มีขนาดเท่ากับแรงดันที่ขั้วแบตเตอรี่ขณะที่ยังไม่มีภาระมาต่อ ($V_{bat,oc}$) แต่หลังจากนี้ไปเมื่อเพิ่มความเร็วรอบอัลเทอร์เนเตอร์ จะส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วอัลเทอร์เนเตอร์เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากมีกระแสไฟฟ้าอัลเทอร์เนเตอร์บางส่วนไหลเข้าไปอัดประจุให้กับแบตเตอรี่ แรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นมาจากแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ นั่นก็คือ แรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วอัลเทอร์เนเตอร์กับแรงดันที่ขั้วแบตเตอรี่ขณะที่ยังไม่มีภาระมาต่อ เมื่อแรงดันขั้วอัลเทอร์เนเตอร์สูงขึ้นจนกระทั่งถึงแรงดันบัสไฟฟ้าอ้างอิง ($V_{bus,ref}$) ทำให้โวลต์เตจเร็กกูเลเตอร์ตอบสนองกับระบบอัลเทอร์เนเตอร์โดยลดค่ากระแสฟิลต์ทำให้ระบบรักษาแรงดันบัสไฟฟ้าสูงสุดได้ซึ่งมีค่าอยู่ที่ 14.4 โวลต์ ในทำนองเดียวกันนี้ ในกรณีที่แบตเตอรี่จะต้องจ่ายกระแสร่วมกับอัลเทอร์เนเตอร์ไปให้ภาระ ทำให้แรงดันบัสไฟฟ้าต่ำลง โวลต์เตจเร็กกูเลเตอร์ตอบสนองกับระบบอัลเทอร์เนเตอร์โดยเพิ่มค่ากระแสฟิลต์ทำให้ระบบอัลเทอร์เนเตอร์ผลิตกำลังไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น แผนผังการทำงานแสดงได้ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แผนผังของระบบอัลเทอร์เนเตอร์

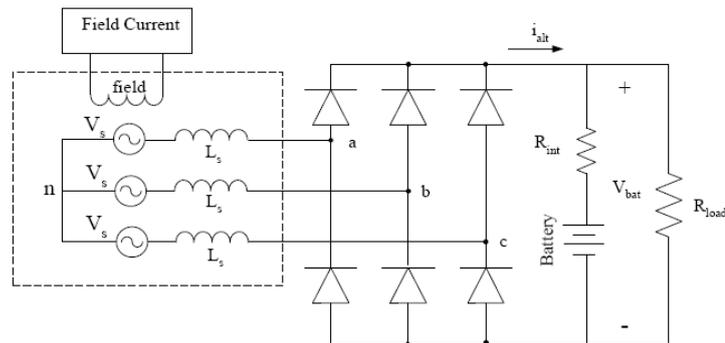
2.3.3 แบบจำลองทางไฟฟ้าอย่างง่ายของอัลเทอร์เนเตอร์แบบล้นเดิลล์

แบบจำลองทางไฟฟ้าอย่างง่ายของอัลเทอร์เนเตอร์แบบล้นเดิลล์ ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ค่ากระแสฟิลด์ (field current: i_f) หาได้จากการปรับค่าของกระแสฟิลด์ ซึ่งประยุกต์การใช้เทคนิคการเปิด-ปิดตามระดับแรงดันของบัสไฟฟ้าโดยมีโวลต์เตจเรกูเลเตอร์ (voltage regulator) เป็นตัวควบคุมการทำงาน ขดลวดอาร์เมเจอร์เชื่อมต่อกันลักษณะแบบวงาย มีค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำต้านกลับ (back emf voltage: V_s) เป็นสัญญาณรูปคลื่นไซน์ ที่ต่ออยู่กับความเหนี่ยวนำซิงโครนัสอาร์เมเจอร์ (armature synchronous inductance: L_s) ความถี่ทางไฟฟ้า (ω) ที่เป็นสัดส่วนกันกับความเร็วทางเครื่องกล (ω_m) และจำนวนโพล $\omega = \left(\frac{p}{2}\right)\omega_m$ ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำต้านกลับเป็นสัดส่วนกับความถี่ทางไฟฟ้าและค่ากระแสขดลวดสนามแม่เหล็ก ดังสมการต่อไปนี้

$$V_s = k\omega i_f \quad (2.2)$$

โดยที่ k = ค่าสัมประสิทธิ์ของอัลเทอร์เนเตอร์

วงจรไดโอดเต็มบริดจ์สำหรับเรียงกระแส จะให้ค่าคงที่ระดับแรงดันเอาต์พุต (V_o) ที่เกี่ยวข้องกับแบตเตอรี่และภาระทางไฟฟ้า



รูปที่ 2.9 แบบจำลองทางไฟฟ้าอย่างง่ายของอัลเทอร์เนเตอร์

2.3.4 การวิเคราะห์วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบภาระแรงดันไฟฟ้าคงที่และพฤติกรรมทางไฟฟ้าของระบบอัลเทอร์เนเตอร์แบบคลื่นเคลื่อนที่

การวิเคราะห์วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบภาระแรงดันไฟฟ้าคงที่ [7,8] เป็นแบบจำลองอย่างง่ายที่ใช้อธิบายกระแสและแรงดันไฟฟ้าของระบบอัลเทอร์เนเตอร์ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน เพื่อทำนายค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตโดยอัลเทอร์เนเตอร์ สำหรับใช้ในการออกแบบการทำงานหรือควบคุมการทำงานของอัลเทอร์เนเตอร์ การที่ระบบอัลเทอร์เนเตอร์ที่มีแบตเตอรี่เชื่อมต่อยู่ ณ ตำแหน่งขั้วปลายของอัลเทอร์เนเตอร์ ทำให้ระบบเกิดข้อจำกัดที่ทำให้ไม่สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากอย่างที่ต้องการ ทำให้ในการออกแบบและควบคุมการทำงานของอัลเทอร์เนเตอร์จึงต้องพิจารณาข้อจำกัด (constraint) ที่เกิดขึ้นกับขนาดแรงดันไฟฟ้าของระบบอัลเทอร์เนเตอร์ที่นำมาประยุกต์ใช้

แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสมดุล 3 เฟส ผลิตแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่เป็นรูปคลื่นสัญญาณไซน์ มีมุมต่างกัน 120 องศา ดังสมการที่ (2.3-2.5)

$$v_A = V_s \sin(\omega t) = V_s \angle 0 \quad (2.3)$$

$$v_B = V_s \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) = V_s \angle -\frac{2\pi}{3} \quad (2.4)$$

$$v_C = V_s \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) = V_s \angle \frac{2\pi}{3} \quad (2.5)$$

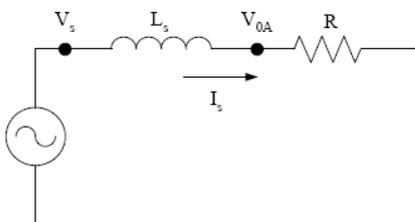
โดยที่ v_A, v_B และ v_C = แรงเคลื่อนไฟฟ้าชั่วขณะของแต่ละเฟส

V_s = ค่าสูงสุดของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นสัญญาณไซน์

ω = ความถี่ทางไฟฟ้า

t = เวลา

วงจรสมมูลระบบอัลเทอร์เนเตอร์แบบล้นเดิลส์เฟสเดียว แสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 วงจรสมมูลของแต่ละเฟส

โดยที่ L_s = ความเหนี่ยวนำขึงโครนัสอาร์เมเจอร์

V_{OA} = แรงดันไฟฟ้าเฟส-นิวทรัล

R = ความต้านทานเสมือน (Equivalence resistance)

I_s = กระแสไฟฟ้าของแต่ละเฟส

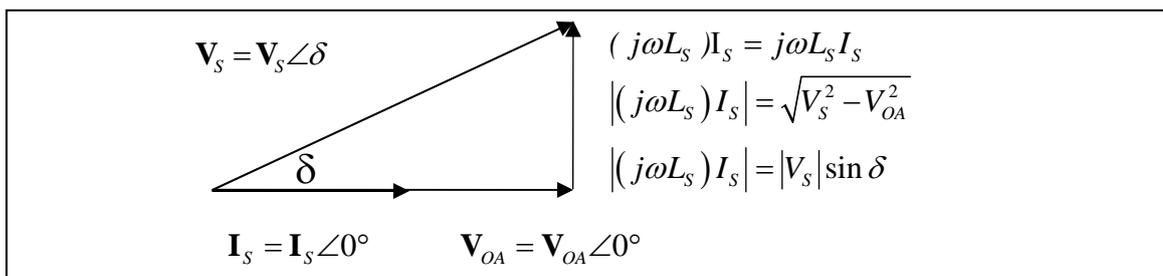
วงจรสมมูลแต่ละเฟสของอัลเทอร์เนเตอร์แบบล้นเดิลส์ ประกอบด้วยแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าซึ่งได้จากการเหนี่ยวนำของขดลวดโรเตอร์ไปยังขดลวดสเตเตอร์ ความเหนี่ยวนำบนสเตเตอร์ และความต้านทานเสมือน ดังแสดงในรูปที่ 2.11 เมื่อพิจารณาภายใต้เงื่อนไขสมมูลทั้ง 3 เฟส กระแสไฟฟ้าที่ไหลในเฟส-เอ มีขนาดเท่ากับกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรสมมูลแต่ละเฟส (เฟส-เอ, เฟส-บี และเฟส-ซี) ของระบบอัลเทอร์เนเตอร์

$$|\mathbf{I}_s| = I_{sA} \quad (2.6)$$

นิยามความต้านทานเสมือนของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบภาระแรงดันไฟฟ้าคงที่ แสดงดังสมการที่ (2.7)

$$R \triangleq \frac{V_{OA}}{I_s} \quad (2.7)$$

จากวงจรสมมูล ดังแสดงในรูปที่ 2.10 สามารถกำหนดให้ $\mathbf{V}_{OA} = |\mathbf{V}_{OA}| \angle 0^\circ$, $\mathbf{V}_s = |\mathbf{V}_s| \angle \phi^\circ$



รูปที่ 2.11 แผนภาพเฟสเซอร์ของแต่ละเฟส

โดยที่ δ = มุมระหว่าง V_S กับ V_{OA} หรือที่เรียกว่า มุมทอร์ก (torque angle)

$$|\mathbf{V}_{OA}|^2 = V_{OA}^2 = |\mathbf{V}_S|^2 - |j\omega L_S \mathbf{I}_S|^2$$

$$V_{OA}^2 = V_S^2 - (\omega L_S I_S)^2 \quad (2.8)$$

จากสมการ (2.8) แทนในสมการที่ (2.7) จะได้ความสัมพันธ์ของความต้านทานเสมือน ดังสมการต่อไปนี

$$R = \frac{\omega L_S V_{OA}}{\sqrt{V_S^2 - V_{OA}^2}} \quad (2.9)$$

ความต้านทานเสมือนเป็นฟังก์ชันของขนาดแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าเฟส-นิวทรัล และความเร็วรอบอัลเทอร์เนเตอร์ ($|\mathbf{V}_S|, |\mathbf{V}_{OA}|, \omega$)

$$R = f(|\mathbf{V}_S|, |\mathbf{V}_{OA}|, \omega) \quad (2.10)$$

จากรูปที่ 2.10 กระแสไฟฟ้าแต่ละเฟส (I_S) สามารถคำนวณได้จากกฎของเคอร์ชอฟฟ์โวลต์เตจ (Kirchhoff's Voltage law) ความสัมพันธ์ของสามเหลี่ยมมุมฉากของทฤษฎีพีทาโกรัส (Pythagorus Theorem) ในแผนภาพเฟสเซอร์รูปที่ 2.11 สามารถคำนวณหากระแสไฟฟ้าแต่ละเฟส (I_S) ได้ ดังนี้

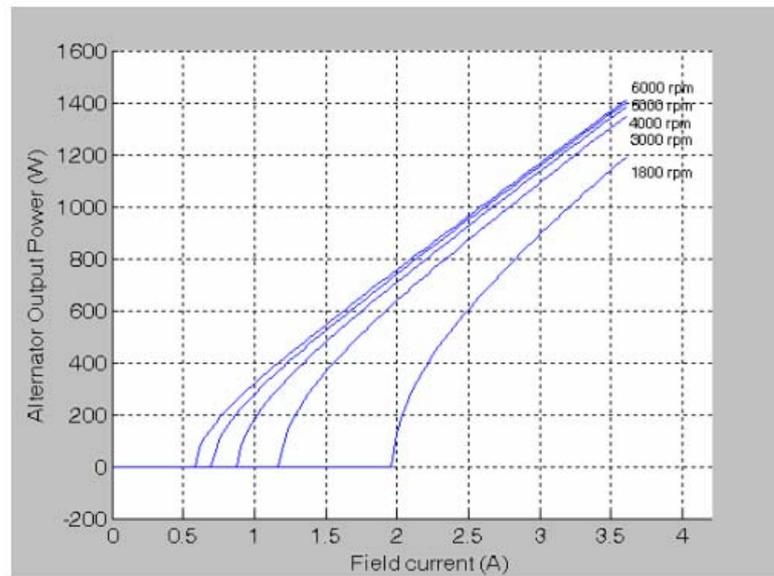
$$\mathbf{I}_S = \frac{\mathbf{V}_S - \mathbf{V}_{OA}}{j\omega L_S}$$

$$I_S = \frac{\sqrt{V_S^2 - V_{OA}^2}}{\omega L_S} \quad (2.11)$$

ดังนั้น กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตที่ได้จากอัลเทอร์เนเตอร์ เมื่อพิจารณา ณ ตำแหน่ง V_{OA} ซึ่งค่ากระแสของเฟส (I_S) จะมีเฟสตรงกัน ($\cos\phi = 1$) เมื่อ ϕ เป็นมุมระหว่าง V_{OA} กับภาระ

$$P_{alt} = \frac{3}{2} V_{OA} I_S \quad (2.12)$$

จากสมการ (2.11) แทนในสมการที่ (2.12) จะได้กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของอัลเทอร์เนเตอร์ เป็นดังสมการ (2.13) เมื่อแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำต้านกลับ (V_S) แทนด้วยสมการ (2.2) จะได้ความสัมพันธ์ของกระแสฟลักซ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของอัลเทอร์เนเตอร์กับค่ากระแสฟิลด์
ในกรณีที่กำหนดให้แรงดันบัลไฟฟ้าคงที่ 14 โวลต์

$$P_{alt} = \frac{3}{2} V_{OA} \frac{\sqrt{V_S^2 - V_{OA}^2}}{\omega L_S} \quad (2.13)$$

พิจารณาสมการกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการวิเคราะห์ (2.13) เปรียบเทียบสมการมุมกำลังไฟฟ้า (Power angle Equation) ในสมการที่ (2.14) จะเห็นได้ว่าเป็นสมการเดียวกัน เนื่องจากความสัมพันธ์ของแผนภาพเฟสเซอร์ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.11 เป็นไปตามสมการที่ (2.15)

$$P_{alt} = \frac{3}{2} \frac{|V_{OA}| |V_S| \sin \delta}{\omega L_S} \quad (2.14)$$

$$|V_S| \sin \delta = \sqrt{V_S^2 - V_{OA}^2} \quad (2.15)$$

2.4 พิจารณาค่าเฉลี่ยกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของอัลเทอร์เนเตอร์

สมการมุมกำลังไฟฟ้าของอัลเทอร์เนเตอร์ที่ได้จากสมการ (2.14) เป็นกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการกำหนดให้ การสูญเสียเนื่องจากความต้านทานบนขดลวดสเตเตอร์เท่ากับศูนย์ ($R_s = 0$) ซึ่งมีค่าเท่ากับกำลังงานทางกลที่ถูกเปลี่ยนให้เป็นกำลังงานไฟฟ้า (P_{conv}) มุมทอร์ก

(torque angle) ที่อยู่ในสมการ (2.17) ซึ่งกำลังงานไฟฟ้าที่จ่ายแก่ภาระจะมีค่าสูงสุด เมื่อ $\delta = 90^\circ$ ซึ่งเป็นไปตามสมการต่อไปนี้

$$P_{alt,max} = \frac{3}{2} \frac{|V_{OA}| |V_S|}{\omega L_S} \quad (2.16)$$

ค่ากำลังไฟฟ้าอัลเทอร์เนเตอร์สูงสุด ($P_{alt,max}$) เป็นค่าจำกัดเสถียรภาพสภาวะสถิตของอัลเทอร์เนเตอร์ (static stability limit) ซึ่งในทางปฏิบัติ ค่ากำลังงานไฟฟ้าเอาต์พุตที่ผลิตโดยอัลเทอร์เนเตอร์ (P_{alt}) ยังห่างจากค่าจำกัดเสถียรภาพสภาวะสถิตของอัลเทอร์เนเตอร์อยู่มาก [21]

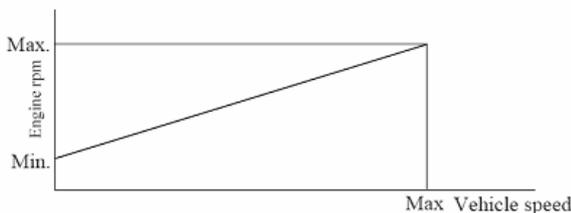
เมื่อพิจารณาสมการกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตอัลเทอร์เนเตอร์ที่ได้จากการวิเคราะห์ระบบอัลเทอร์เนเตอร์ด้วยภาวะแรงดันไฟฟ้าคงที่ (2.13) กับสมการมุมกำลังไฟฟ้า (2.14) จะพบว่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตอัลเทอร์เนเตอร์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยภาวะแรงดันไฟฟ้าคงที่มีข้อจำกัดในเรื่องแรงดันบัสไฟฟ้าซึ่งเกี่ยวข้องกับแรงดันไฟฟ้าปลายของอัลเทอร์เนเตอร์ทางด้านฝั่งกระแสกลับ (V_{OA}) เช่นเดียวกับสมการมุมกำลังไฟฟ้า เพียงแต่สมการมุมกำลังไฟฟ้าไม่ปรากฏข้อจำกัดทางด้านคณิตศาสตร์ เพราะฉะนั้นการวิเคราะห์หอบเขตกำลังไฟฟ้าอัลเทอร์เนเตอร์จะอาศัยสมการกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตอัลเทอร์เนเตอร์ที่ได้จากการวิเคราะห์ระบบอัลเทอร์เนเตอร์ด้วยภาวะแรงดันไฟฟ้าคงที่มาอธิบาย เนื่องจากสมการดังกล่าวได้ผ่านการตรวจสอบผลลัพธ์และยอมรับว่าสามารถทำนายกำลังไฟฟ้าอัลเทอร์เนเตอร์ในรถยนต์ได้จากงานวิจัย [7-10]

พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับกำลังไฟฟ้าที่อัลเทอร์เนเตอร์ผลิตได้ มี 2 ตัว คือ ความเร็วรอบอัลเทอร์เนเตอร์/นาที (rpm) ซึ่งต่อไปนี้อธิบายเป็น ความเร็วรอบอัลเทอร์เนเตอร์ ซึ่งเกี่ยวข้องกับความเร็วทางไฟฟ้า (ω) และแรงดันไฟฟ้าปลายของอัลเทอร์เนเตอร์ทางด้านฝั่งกระแสกลับ (V_{OA}) ซึ่งเกี่ยวข้องกับแรงดันบัสไฟฟ้าของระบบอัลเทอร์เนเตอร์ (V_{bus}) เมื่อพิจารณาในส่วนของความเร็วรอบอัลเทอร์เนเตอร์ สามารถแยกการพิจารณา เป็นดังนี้

1) กรณีความเร็วรอบอัลเทอร์เนเตอร์ต่ำและปานกลาง ค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตที่ผลิตโดยอัลเทอร์เนเตอร์จะเป็นไปตามสมการมุมกำลังไฟฟ้า (power angle equation) จะมากขึ้นเพียงใด ขึ้นอยู่กับความเร็วรอบอัลเทอร์เนเตอร์ที่ปรากฏ ซึ่งความเร็วรอบอัลเทอร์เนเตอร์ขณะที่รถยนต์หยุดนิ่ง เรียกว่า ความเร็วอัลเทอร์เนเตอร์หมุนเปล่า (Ideal speed) ความสัมพันธ์ความเร็วรอบเครื่องยนต์กับความเร็วรถยนต์ ดังที่แสดงในรูป 2.13

- ความเร็วรอบเครื่องยนต์แปรผันตรงกับความเร็วรถยนต์
- เมื่อความเร็วรถเป็นศูนย์ ความเร็วรอบเครื่องยนต์ถูกตั้งไว้ที่ความเร็วรอบหมุนเปล่า

- เมื่อความเร็วรถมากที่สุด ความเร็วรอบเครื่องยนต์มากที่สุดเช่นกัน



รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ความเร็วรอบเครื่องยนต์กับความเร็วรถยนต์

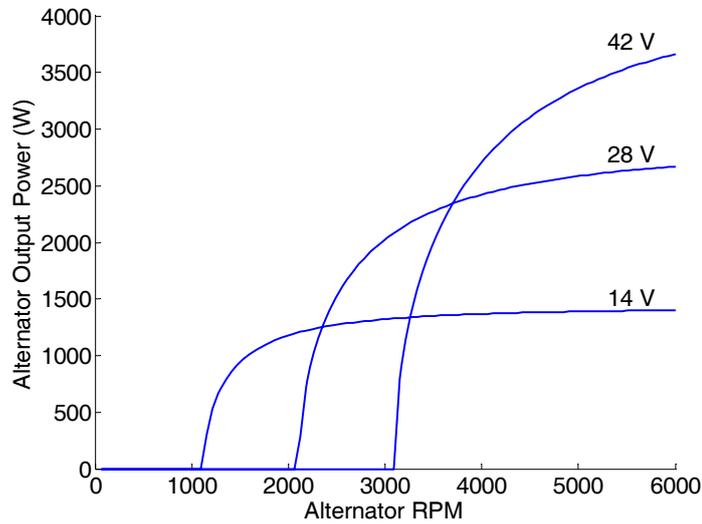
2) กรณีที่ความเร็วรอบอัลเทอร์เนเตอร์สูงซึ่งเป็นผลให้ $V_s \gg V_{OA}$ สามารถพิจารณาสมการกำลังไฟฟ้าอัลเทอร์เนเตอร์ได้สมการที่ (2.17) และค่ากระแสฟิลด์มีค่าดังสมการ (2.18) ซึ่งกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตอัลเทอร์เนเตอร์แปรผันตามค่ากระแสฟิลด์ ($P_{out} \propto i_f$)

$$P_{alt} = \frac{3}{2} V_{OA} \frac{k i_f}{L_s} \tag{2.17}$$

$$i_f = P_{alt} \frac{2L_s}{3V_{OA}k} \tag{2.18}$$

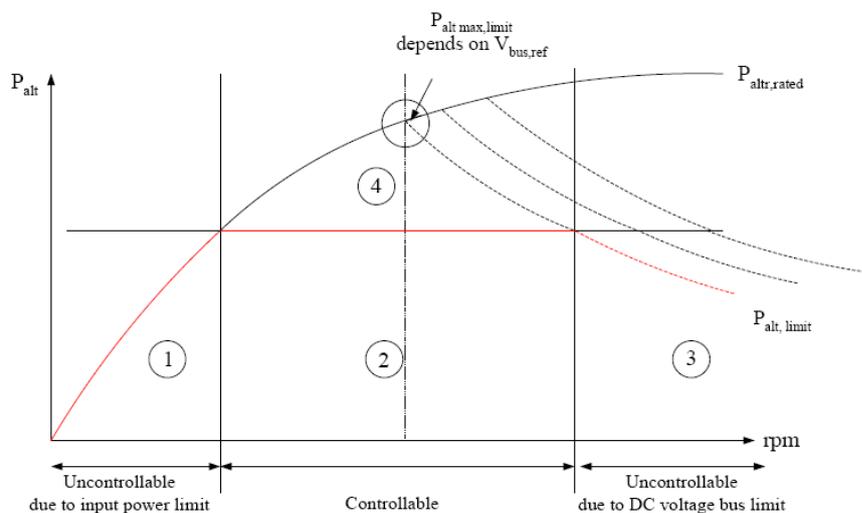
ส่วนการพิจารณาแรงดันไฟฟ้าปลายของอัลเทอร์เนเตอร์ทางด้านฝั่งกระแสลับ (V_{OA}) ซึ่งเกี่ยวข้องกับแรงดันบัสไฟฟ้าของระบบอัลเทอร์เนเตอร์ (V_{bus}) มีผลต่อการควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยตรง ระบบกำลังไฟฟ้ายนต์ปัจจุบันได้ใช้ผลของแรงดันบัสไฟฟ้าเป็นตัวควบคุมปริมาณกระแสฟิลด์ (i_f) ซึ่งถือว่าแรงดันบัสไฟฟ้ามีอิทธิพลต่อการทำงานของระบบ อย่างเช่นระบบปัจจุบัน มีการควบคุมแรงดันไฟฟ้าบัสที่ 14.4 โวลต์ ก็จะเรียกการทำงานของระบบว่าเป็น ระบบกำลัง 14 โวลต์ ขณะเดียวกันนี้ ระบบกำลัง 28 โวลต์ ได้นำมาใช้กับรถยนต์ปัจจุบัน และในอนาคตอันใกล้นี้ ระบบกำลัง 42 โวลต์ จะนำมาประยุกต์ใช้กับรถยนต์ หลังจากที่กลุ่มทำงานของ MIT ด้านระบบและอุปกรณ์ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ขั้นสูงสำหรับรถยนต์ (MIT Consortium on Advanced Automotive Electrical/Electronic Systems and Components [22]) ได้ผลักดันให้เพิ่มระดับแรงดันที่บัสกำลัง (Power Bus) จาก 14 โวลต์ เป็น 42 โวลต์ ทำให้กระแสลดลงสามเท่า เพื่อประโยชน์ขนาดของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor Devices) น้ำหนักของสายตัวนำ และสนองต่อความต้องการกำลังไฟฟ้าที่เพิ่มสูงขึ้น ผลการจำลองการทำงานของระบบประจุไฟฟ้าที่ประกอบด้วยอัลเทอร์เนเตอร์ วงจรเรียงกระแสแบบเต็มบริดจ์และแบตเตอรี่ ในขณะที่คุมค่าแรงดันที่บัสกำลังไว้ที่ระดับแรงดันต่างๆ 3 ระดับ ได้แก่ 14 โวลต์ 28 โวลต์ และ 42 โวลต์ ด้วยโปรแกรม MATLAB ดังแสดงในรูปที่ 2.14 พบว่า ค่าพิกัดกำลังสูงสุดของอัลเทอร์เนเตอร์จะเพิ่มขึ้น ตาม

แรงดันที่บัสกำลังที่เพิ่มขึ้น โดยความเร็วรอบต่ำสุด ที่อัลเทอร์เนเตอร์เริ่มจ่ายกำลังก็จะเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน



รูปที่ 2.14 กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตต่อความเร็วรอบของอัลเทอร์เนเตอร์

การวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตอัลเทอร์เนเตอร์ แบ่งการพิจารณาออกเป็น 2 ส่วน คือขีดความสามารถของอัลเทอร์เนเตอร์ในการผลิตกำลังไฟฟ้าภายใต้เงื่อนไขข้อจำกัดของพิกัดของอัลเทอร์เนเตอร์เองซึ่งขึ้นอยู่กับข้อกำหนดและเลือกใช้อัลเทอร์เนเตอร์ให้เหมาะสมกับภาระที่ใช้งานในรถยนต์ และขีดความสามารถของอัลเทอร์เนเตอร์ในการผลิตกำลังไฟฟ้าภายใต้ข้อจำกัดของระบบซึ่งเป็นสิ่งที่น่าสนใจ เพื่อประโยชน์ในด้านการออกแบบระบบควบคุมกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของอัลเทอร์เนเตอร์ที่เป็นอยู่ในปัจจุบัน



รูปที่ 2.15 กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของอัลเทอร์เนเตอร์

โดยที่

P_{alt} = กำลังไฟฟ้าอัลเทอร์เนเตอร์

$P_{alt,rated}$ = พิกัดกำลังไฟฟ้าอัลเทอร์เนเตอร์

$P_{alt,limit}$ = ค่าจำกัดกำลังไฟฟ้าอัลเทอร์เนเตอร์ เนื่องจากผลของแรงดันบัสไฟฟ้า

$P_{alt,max,limit}$ = ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดอัลเทอร์เนเตอร์ ก่อนที่แรงดันบัสไฟฟ้าจะมีผลต่อการผลิตกำลังไฟฟ้าอัลเทอร์เนเตอร์

เส้นที่บัสค่า ($P_{alt,rated}$) เป็นพิกัดกำลังไฟฟ้าอัลเทอร์เนเตอร์ที่ความเร็วรอบของอัลเทอร์เนเตอร์ใดๆ กำลังไฟฟ้าที่อัลเทอร์เนเตอร์ผลิตได้ ไม่ว่าจะที่ความเร็วรอบใดๆ จะไม่มากไปกว่าเส้นนี้ จึงถือว่าเป็นเส้นกราฟแทนกำลังไฟฟ้าอัลเทอร์เนเตอร์มากที่สุด ($P_{alt,control}$)

เส้นปะ ($P_{alt,limit}$) เป็นกำลังไฟฟ้าอัลเทอร์เนเตอร์ที่ถูกจำกัดโดยโวลต์เตจเร็กกูเลเตอร์ ซึ่งทำงานตามแรงดันบัสไฟฟ้า

เส้นสีแดง ($P_{alt,control}$) เป็นกำลังไฟฟ้าอัลเทอร์เนเตอร์ที่ถูกจำกัดโดยระบบคุมค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าของอัลเทอร์เนเตอร์ ซึ่งทำงานตามกระแสและแรงดันบัสไฟฟ้าอัลเทอร์เนเตอร์

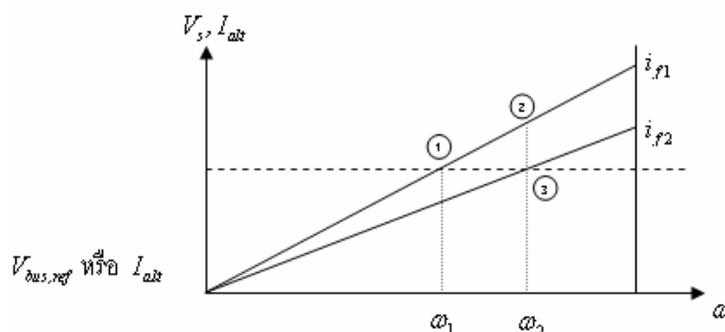
เมื่อพิจารณาพื้นที่บริเวณใต้กราฟกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของอัลเทอร์เนเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.15 สามารถแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ดังต่อไปนี้

1. พื้นที่บริเวณ ① เป็นพื้นที่แทนกำลังไฟฟ้าอัลเทอร์เนเตอร์ที่ไม่สามารถควบคุมการผลิตของอัลเทอร์เนเตอร์
2. พื้นที่บริเวณ ② เป็นพื้นที่แทนกำลังไฟฟ้าอัลเทอร์เนเตอร์ที่สามารถควบคุมการผลิตได้โดยระบบคุมค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าของอัลเทอร์เนเตอร์ก่อนที่จะถึงพิกัดแรงดันบัสไฟฟ้า ($V_{bus,ref}$) การควบคุมกำลังไฟฟ้าที่ผลิตโดยอัลเทอร์เนเตอร์อยู่ภายใต้เงื่อนไขความต้องการกำลังไฟฟ้าของภาระ ความต้องการประจุไฟให้กับแบตเตอรี่ และค่าพิกัดแรงดันบัสไฟฟ้า
3. พื้นที่บริเวณ ③ เป็นพื้นที่แทนกำลังไฟฟ้าอัลเทอร์เนเตอร์ที่ไม่สามารถควบคุมการผลิตของอัลเทอร์เนเตอร์ได้ เนื่องจากผลการทำงานของระบบคุมค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของอัลเทอร์เนเตอร์ต่อกระแสฟิลต์ที่ป้อนให้ขดลวดสนามโรเตอร์ เป็นผลให้ความสามารถการผลิตของอัลเทอร์เนเตอร์ลดลง เพื่อรักษาระดับพิกัดแรงดันบัสไฟฟ้าให้ไม่เกินค่าที่กำหนด
4. พื้นที่บริเวณ ④ เป็นพื้นที่แสดงความแตกต่างของกำลังไฟฟ้าอัลเทอร์เนเตอร์ ระหว่างกำลังไฟฟ้าอัลเทอร์เนเตอร์มากที่สุด ($P_{alt,max}$) กับกำลังไฟฟ้าอัลเทอร์เนเตอร์ที่ถูกควบคุมการผลิต ($P_{alt,control}$) โดยระบบคุมค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าของอัลเทอร์เนเตอร์ ซึ่งเป็นกำลังไฟฟ้าที่อยู่

เหนือความต้องการของภาระและระบบประจุไฟ หากสามารถควบคุมให้อัลเทอร์เนเตอร์ผลิตได้ใช้ อย่างเพียงพอกับความต้องการของระบบอัลเทอร์เนเตอร์แล้ว กำลังไฟฟ้าส่วนนี้จะมีส่วนช่วย ประหยัดพลังงานและเกิดประสิทธิผลในการนำไปใช้งาน

2.5 วิเคราะห์การทำงานของระบบคุมค่าแรงดันบิดและกระแสไฟฟ้าของอัลเทอร์เนเตอร์

การทำงานของระบบคุมค่าแรงดันบิดและกระแสไฟฟ้าของอัลเทอร์เนเตอร์สำหรับคุมค่า พิกัดแรงดันบิดไฟฟ้าหรือกระแสอัลเทอร์เนเตอร์ ส่งผลให้กระแสฟิลต์ที่ป้อนให้ขดลวดสนามโรเตอร์ มีการเปลี่ยนแปลงสัมพันธ์กับความเร็วรอบของอัลเทอร์เนเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของความเร็วรอบอัลเทอร์เนเตอร์ และกระแสฟิลต์ที่มีผลต่อพิกัดแรงดันไฟฟ้า

การเปลี่ยนแปลงแบ่งออกเป็น 3 ตำแหน่ง ดังนี้

ตำแหน่ง ① $V_{s1} = k\omega_1 i_{f1}$

แรงเคลื่อนไฟฟ้าของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าอัลเทอร์เนเตอร์ของแต่ละเฟส (หรือกระแสไฟฟ้าของ อัลเทอร์เนเตอร์) ที่ความถี่ทางไฟฟ้า ω_1 และกระแสฟิลต์ i_{f1} สำหรับผลิตกำลังไฟฟ้าอัลเทอร์เนเตอร์ ให้กับภาระและแบตเตอรี่

ตำแหน่ง ② $V_{s2} = k\omega_2 i_{f1} ; \omega_2 > \omega_1$

แรงเคลื่อนไฟฟ้าชั่วขณะของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าอัลเทอร์เนเตอร์ของแต่ละเฟส (หรือกระแสไฟฟ้า ของอัลเทอร์เนเตอร์) ที่ความถี่ทางไฟฟ้า ω_2 และกระแสฟิลต์ i_{f1} มีค่าสูงกว่าพิกัดแรงดันบิดไฟฟ้า (กระแสอัลเทอร์เนเตอร์ที่ต้องการ)

ตำแหน่ง ③ $V_{s3} = k\omega_2 i_{f2} ; i_{f2} < i_{f1}$ โดยที่ $V_{s1} = V_{s3}$

แรงเคลื่อนไฟฟ้าของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าอัลเทอร์เนเตอร์ของแต่ละเฟส (หรือกระแสไฟฟ้าของ

อัลเทอร์เนเตอร์) ที่ตำแหน่ง ① มีค่าเท่ากับที่ตำแหน่ง ③ เนื่องจากผลการทำงานของระบบควบคุมค่าแรงดันและกระแสอัลเทอร์เนเตอร์โดยการควบคุมกระแสฟิลด์ที่ป้อนให้ขดลวดสนามโรเตอร์เมื่อความเร็วรอบอัลเทอร์เนเตอร์เพิ่มสูงขึ้น จึงปรับลดกระแสฟิลด์ลง เพื่อรักษาค่าพิกัดแรงดันบัสไฟฟ้าหรือค่ากระแสอัลเทอร์เนเตอร์ตามที่ภาวะและแบตเตอรี่ต้องการให้คงที่

การควบคุมกำลังไฟฟ้าอัลเทอร์เนเตอร์โดยควบคุมค่าแรงดันบัสไฟฟ้า เป็นวิธีควบคุมที่ระบบอัลเทอร์เนเตอร์ปัจจุบันได้นำมาใช้งานโดยอาศัยโวลต์เตจเรกูเลเตอร์ แต่ปัญหาที่พบคือโวลต์เตจเรกูเลเตอร์ไม่สามารถเปลี่ยนระดับแรงดันบัสอ้างอิงได้อย่างอิสระเพื่อควบคุมกำลังไฟฟ้าได้โดยตรง การใช้งานโวลต์เตจเรกูเลเตอร์ต้องตั้งค่าแรงดันบัสไฟฟ้าอ้างอิงก่อน เมื่อเป็นเช่นนี้ กำลังไฟฟ้าที่อัลเทอร์เนเตอร์ผลิตได้จะเป็นไปตามสมการมุมกำลัง (2.14) ซึ่งจากการวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของอัลเทอร์เนเตอร์ จะพบว่าจะมีกำลังไฟฟ้าบางส่วนอยู่เหนือความต้องการของภาวะและระบบประจุไฟ หากต้องการตั้งค่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงโดยตรงก็สามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าได้แต่ไม่ใช่เรื่องง่าย เพราะการตั้งค่าแรงดันบัสไฟฟ้าอ้างอิง จะเปลี่ยนไปตามสภาพของภาวะ ดังนั้น งานวิจัยนี้ จึงมีแนวคิดที่จะพัฒนาระบบควบคุมค่าแรงดันบัสและกระแสไฟฟ้าของอัลเทอร์เนเตอร์ เพื่อควบคุมการผลิตกำลังไฟฟ้าของอัลเทอร์เนเตอร์ตามความต้องการกำลังไฟฟ้าของภาวะและระบบประจุไฟเข้าแบตเตอรี่