

การควบคุมการผลิตกำลังไฟฟ้าตามความต้องการของภาระ
ในระบบประจุไฟรถยนต์

โดย

วีรชัย พัฒนพิบูล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

พ.ศ. 2550

การควบคุมการผลิตกำลังไฟฟ้าตามความต้องการของภาระในระบบประจุไฟรถยนต์

Control of Power Generation with Load Demand in Automotive
Charging Systems

โดย

นายวีรชัย พัฒนพิบูล

Mr. Werachai Pattanapiboon

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

พ.ศ. 2550

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

วิทยานิพนธ์

ของ

นายวีรชัย พัฒนพิบูล

เรื่อง

การควบคุมการผลิตกำลังไฟฟ้าตามความต้องการของภาระในระบบประจุไฟรถยนต์

ได้รับการตรวจสอบและอนุมัติ ให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

เมื่อ วันที่ 23 เดือน มีนาคม พ.ศ. 2550

ประธานกรรมการวิทยานิพนธ์

(รองศาสตราจารย์ นรินทร์ วัฒนกุล)

กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไพฑูริย์ นาคมหาชลาลัย)

กรรมการวิทยานิพนธ์

(รองศาสตราจารย์ ดร.สัญญา มิตรเอม)

กรรมการวิทยานิพนธ์

(ดร. กนกเวทย์ ตั้งพิมพ์รัตน์)

คณบดี

(รองศาสตราจารย์ ดร.อุรุยา วิสกุล)

บทคัดย่อ

ระบบประจุไฟรถยนต์เป็นส่วนที่มีความสำคัญต่อการควบคุมการผลิตกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของอัลเทอร์เนเตอร์ในรถยนต์ เนื่องจากกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตที่ผลิตได้ในแต่ละความเร็วรอบของอัลเทอร์เนเตอร์ขึ้นอยู่กับแรงดันบัลไฟฟ้าโดยมีโวลต์เตจเรกูเลเตอร์ (Voltage Regulator) เป็นตัวควบคุมการทำงาน แต่อย่างไรก็ตามการทำงานของโวลต์เตจเรกูเลเตอร์มีจุดประสงค์หลักในการจำกัดแรงดันบัลไฟฟ้าขอบบน (Upper Voltage Limiter) เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการอัดประจุไฟแบตเตอรี่ที่มากเกินไป หากพิจารณาในเรื่องการควบคุมกำลังไฟฟ้าตามความต้องการของภาระแล้ว ระบบประจุไฟยังคงมีขีดความสามารถจำกัดในการควบคุมกำลังไฟฟ้าอยู่ที่เฉพาะขอบเขตบนของแรงดันบัลไฟฟ้าที่ค่าหนึ่ง ทั้งที่แบตเตอรี่ที่เชื่อมต่อกับอัลเทอร์เนเตอร์ได้ให้ความเป็นอิสระในการผลิตกำลังไฟฟ้าของอัลเทอร์เนเตอร์ ซึ่งความเป็นอิสระนี้เกิดขึ้นได้เนื่องจากผลต่างของแรงดันไฟฟ้าระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่ขณะเปิดวงจร ($V_{bat,oc}$) กับแรงดันบัลไฟฟ้า (V_{bus}) แต่ความเป็นอิสระของแบตเตอรี่ไม่ได้ถูกนำมาใช้งานเพื่อประโยชน์ในการควบคุมกำลังไฟฟ้าอย่างเด่นชัด เพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการควบคุมกำลังไฟฟ้าอัลเทอร์เนเตอร์ งานวิจัยนี้จึงนำเสนอแนวทางการพัฒนาระบบประจุไฟรถยนต์โดยอาศัยตัวควบคุมกระแสและแรงดันไฟฟ้าของอัลเทอร์เนเตอร์ (Voltage and Current Controller: VCC) เพื่อควบคุมการผลิตกำลังไฟฟ้าของอัลเทอร์เนเตอร์ให้เป็นไปตามความต้องการของภาระ การทำงานวิจัยได้แบ่งเป็น 2 ส่วน คือ การสร้างแบบจำลองอัลเทอร์เนเตอร์โดยอาศัยข้อมูลจากผลการทดสอบคุณลักษณะของอัลเทอร์เนเตอร์แบบล้นเดลล์ขนาด 50 แอมป์ 12 โวลต์ สำหรับศึกษาผลการนำเทคนิคและหลักการทางอิเล็กทรอนิกส์กำลังมาประยุกต์ใช้ เพื่อควบคุมการผลิตของอัลเทอร์เนเตอร์ และการสร้างวงจรต้นแบบ VCC สำหรับตรวจสอบแนวคิดการควบคุมกำลังไฟฟ้าตามความต้องการของภาระ ผลการทดสอบแบบจำลองอัลเทอร์เนเตอร์แสดงให้เห็นการทำนายกำลังไฟฟ้าได้ถูกต้องมากขึ้นและครอบคลุมย่านการทำงานของอัลเทอร์เนเตอร์ ส่วนผลทดสอบการทำงานของวงจรต้นแบบ VCC แสดงให้เห็นความสามารถในการควบคุมกำลังไฟฟ้าตามภาระและผลต่างกำลังไฟฟ้าเมื่อเปรียบเทียบกับควบคุมแบบโวลต์เตจเรกูเลเตอร์ในกรณีที่กระแสไหลเข้าแบตเตอรี่เท่ากับ 0 และ 5 แอมป์ นอกจากนี้ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสฟิลต์กับกระแสอัลเทอร์เนเตอร์และความเร็วรอบของอัลเทอร์เนเตอร์ ($i_f \propto (I_{alt}, \omega)$) เพื่อยืนยันผลการทำงานของวงจร VCC อย่างมีแบบแผน

Abstract

The automotive charging system is necessary for controlling power output generation of an alternator for a vehicle. The generation of output power in each speed of the alternator is dependent upon the bus voltage, controlled by a voltage regulator. In general, the automotive charging system emphasizes on the alternator's generated power. However, the main duty of voltage regulator is to limit upper voltage limiter in order to prevent an overcharge. If considering in voltage control as needed by load, the automotive charging system still has a limited potential even that a battery connected to the alternator allows the alternator to generate a voltage freely. This freedom is from the difference between terminal voltage of battery and the bus voltage. Even that, the freedom can't be used clearly for controlling voltage in order to increase its ability to control a alternator power. The research presents the way to develop the automotive charging system by bringing voltage and current controller: VCC, instead of voltage regulator, to use to control the power generation of alternator as needed by load. The research methodology can be divided into 2 parts: First, to build an alternator system modeling, and to apply any techniques or electronic theories to the model in order to make use of controlling the alternator's generation, Second to produce a prototype of VCC to audit the idea of voltage control as needed by load. The result of the alternator modeling shows that using an averaged armature synchronous inductance varying with field current can predict power alternator more precisely and cover its operation. In the case of VCC prototype, it shows the potential in controlling power generation with time-varying load demand, and the difference of power when compared with the voltage regulator (when the alternator currents flowing to the battery are 0 and 5 A). Moreover, it shows the relationships between the fields current versus the alternator current, the field current versus a speed of the alternator. These results ensure that VCC works properly.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ไม่อาจสำเร็จลงได้ด้วยดีหากปราศจากคำแนะนำ องค์ความรู้ อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย และความเอาใจใส่ของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไพบูลย์ นาคมหาชาติสินธุ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ที่ได้เสียสละเวลาในการให้คำปรึกษา และแนวทางในเรื่องของการทำงานวิจัย ซึ่งทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความน่าสนใจและครบถ้วนสมบูรณ์

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณคณาจารย์ผู้ร่วมเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบด้วย รองศาสตราจารย์ นรินทร์ วัฒนกุล รองศาสตราจารย์ ดร.สัจญา มิตรเอม ดร.กนกเวทย์ ตั้งพิมลรัตน์ และอาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ให้ในทุกแขนง คุณบุญเรือน กล้าสุขและคุณบุษราภรณ์ พูลภักดี สำหรับความช่วยเหลือในด้านเอกสาร เพื่อนๆ พี่ๆ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าที่ให้คำปรึกษาและเกื้อกูลในด้านการเรียนเสมอมา

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และสมาชิกในครอบครัวทุกคน รวมถึงคุณสุนทรีวรรณ กาญจนศรี ที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจให้เสมอมาเป็นอย่างดี

สุดท้ายผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่ให้ทุนสำหรับการศึกษาและวิจัย ทำให้การงานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จด้วยดี ประโยชน์ประการใดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่บุคคลเบื้องต้นดังกล่าว ส่วนข้อผิดพลาดประการใด ผู้วิจัยขอน้อมรับแต่เพียงผู้เดียว

วีรัชย์ พัฒนพิบูล

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

พ.ศ. 2550

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(1)
กิตติกรรมประกาศ.....	(3)
สารบัญภาพประกอบ.....	(7)
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหาทางานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	4
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย	5
2. แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 ระบบไฟฟ้าที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน	6
2.2 ระบบประจุไฟฟ้าในรถยนต์.....	7
2.2.1 อัลเทอร์เนเตอร์(Alternator).....	8
2.2.2 วงจรเรียงกระแสและโวลต์เตจเร็กกูเลเตอร์.....	8
2.2.3 แบตเตอรี่รถยนต์	10
2.3 แบบจำลองระบบกำลังไฟฟ้ารถยนต์	10
2.3.1 แบบจำลองภาระทางไฟฟ้า.....	11
2.3.2 แบบจำลองแบตเตอรี่.....	11
2.3.3 แบบจำลองทางไฟฟ้าอย่างง่ายของอัลเทอร์เนเตอร์แบบล้นเดลล์.....	14
2.3.4 การวิเคราะห์วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบภาระแรงดันไฟฟ้าคงที่และ พฤติกรรมทางไฟฟ้าของระบบอัลเทอร์เนเตอร์แบบล้นเดลล์.....	15

2.4	พิจารณาค่าเฉลี่ยกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของอัลเทอร์เนเตอร์.....	18
2.5	วิเคราะห์การทำงานของระบบคุมค่าแรงดันบัลและกระแสไฟฟ้าของอัลเทอร์เนเตอร์.....	23
3.	วิธีการวิจัย.....	25
3.1	การจำลองระบบกำลังไฟฟ้ารถยนต์บนโปรแกรม Matlab/Simulink.....	26
3.2	การติดตั้งเครื่องมือวัดต่างๆ เพื่อทดสอบการทำงานของอัลเทอร์เนเตอร์.....	28
3.3	การทดสอบคุณลักษณะของอัลเทอร์เนเตอร์แบบดันเดลต์.....	34
3.4	การพัฒนาระบบกำลังไฟฟ้าอัลเทอร์เนเตอร์.....	39
3.5	การออกแบบวงจรควบคุมแรงดันและกระแสไฟฟ้าของอัลเทอร์เนเตอร์ (Voltage and Current Alternator Controller: VCC).....	40
3.6	อุปกรณ์และหลักการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆ ในวงจรควบคุมแรงดันและกระแสไฟฟ้าของอัลเทอร์เนเตอร์ (VCC).....	44
3.7	การตั้งค่าต่างๆ บนวงจรควบคุมแรงดันและกระแสไฟฟ้าของอัลเทอร์เนเตอร์..	49
4.	การทดสอบและวิเคราะห์ข้อมูล	51
4.1	วิธีการตรวจสอบความถูกต้องแบบจำลองระบบอัลเทอร์เนเตอร์กับผลการวัดจริง.....	52
4.2	ทดสอบและเปรียบเทียบผลการทำงานวงจรต้นแบบ VCC ที่นำเสนอกับโวลต์เตจเร็กกูเลเตอร์แบบที่ใช้งานทั่วไป	57
5.	อภิปรายผล	70
5.1	วิจารณ์ผลการทดสอบ	71
5.2	ข้อจำกัดของงานวิจัย.....	72
5.3	การประยุกต์ใช้กับระบบรถยนต์.....	73
5.4	แนวทางพัฒนาและงานวิจัยต่อเนื่อง	77

6 บทสรุป.....	78
บรรณานุกรม	80
ประวัติการศึกษา.....	83

สารบัญภาพประกอบ

ภาพที่		หน้า
1.1	แนวโน้มความต้องการกำลังไฟฟ้าในรถยนต์	1
2.1	โครงสร้างระบบไฟฟ้ารถยนต์ปัจจุบัน.....	6
2.2	แผนผังวิธีการคุมค่ากระแสฟิลต์ของระบบประจุไฟฟ้าในรถยนต์ทั่วไป.....	7
2.3	การควบคุมกระแสฟิลต์ด้วยวิธีการเปิด-ปิดกระแสเข้าขดลวดสนามโรเตอร์....	8
2.4	หลักการงานทั่วไปของโวลต์เตจเร็กกูเลเตอร์	9
2.5	โครงสร้างกำลังไฟฟ้าในรถยนต์.....	10
2.6	แบบจำลองแบตเตอรี่.....	12
2.7	ผลต่างแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วอัลเทอร์เนเตอร์กับแรงดันแบตเตอรี่ขณะเปิดวงจร....	13
2.8	แผนผังของระบบอัลเทอร์เนเตอร์.....	14
2.9	แบบจำลองทางไฟฟ้าอย่างง่ายของอัลเทอร์เนเตอร์	15
2.10	วงจรสมมูลของแต่ละเฟส	16
2.11	แผนภาพเฟสเซอร์ของแต่ละเฟส	16
2.12	ความสัมพันธ์กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตอัลเทอร์เนเตอร์กับค่ากระแสฟิลต์ ในกรณี ที่กำหนดให้แรงดันบัสไฟฟ้าคงที่ 14 โวลต์.....	18
2.13	ความสัมพันธ์ความเร็วรอบเครื่องยนต์กับความเร็วรถยนต์.....	20
2.14	กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตต่อความเร็วรอบของอัลเทอร์เนเตอร์	21
2.15	กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของอัลเทอร์เนเตอร์	21
2.16	ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของความเร็วรอบอัลเทอร์เนเตอร์และกระแสฟิลต์ ที่มีผลต่อพิกัดแรงดันไฟฟ้า.....	23
3.1	แผนผังแบบจำลองกำลังไฟฟ้าอัลเทอร์เนเตอร์.....	26
3.2	อัลเทอร์เนเตอร์บนโปรแกรม Matlab/Simulink	27
3.3	ไดโอดเต็มบริจด์เรียงกระแสของระบบอัลเทอร์เนเตอร์บนโปรแกรม Matlab/Simulink	27
3.4	ภาวะและแบตเตอรี่ของระบบอัลเทอร์เนเตอร์บนโปรแกรม Matlab/Simulink	28
3.5	โวลต์เตจเร็กกูเลเตอร์ของระบบอัลเทอร์เนเตอร์บนโปรแกรม Matlab/Simulink	28
3.6	แผนภาพของส่วนประกอบระบบกำลังไฟฟ้ารถยนต์ที่ใช้ทดสอบ	29

3.7	ระบบทดสอบอัลเทอร์เนเตอร์-โวลต์เตจเร็กกูเลเตอร์.....	29
3.8	มอเตอร์เหนี่ยวนำเหนี่ยวนำสำหรับใช้ขับอัลเทอร์เนเตอร์.....	30
3.9	อินเวอร์เตอร์.....	30
3.10	อัลเทอร์เนเตอร์ ขนาด 50 แอมป์ 12 โวลต์ที่ใช้ทดสอบ.....	31
3.11	ส่วนประกอบและข้อต่างๆ ของอัลเทอร์เนเตอร์รถยนต์.....	31
3.12	แบตเตอรี่รถยนต์ชนิดกรดตะกั่วแบบไม่ต้องเติมน้ำกลั่นบ่อย.....	32
3.13	ภาระทางไฟฟ้าของระบบอัลเทอร์เนเตอร์-โวลต์เตจเร็กกูเลเตอร์.....	32
3.14	เครื่องมือวัดและอุปกรณ์ตรวจจับสนญาณต่างๆ ในระบบไฟฟ้า.....	34
3.15	แผนภาพวงจรที่ใช้ทดสอบขณะเปิดวงจร.....	35
3.16	ความสัมพันธ์กระแสฟิลต์กับแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรของอัลเทอร์เนเตอร์ แบบล้นเดลล์ที่ความเร็วรอบอัลเทอร์เนเตอร์ค่าต่างๆ.....	35
3.17	แผนภาพวงจรที่ใช้ทดสอบขณะลัดวงจร.....	36
3.18	ความสัมพันธ์กระแสฟิลต์กับกระแสขณะลัดวงจรของอัลเทอร์เนเตอร์แบบ ล้นเดลล์ที่ความเร็วรอบอัลเทอร์เนเตอร์ค่าต่างๆ.....	36
3.19	ความสัมพันธ์ความเหนี่ยวนำซึ่งโครนัสกับกระแสฟิลต์.....	37
3.20	ความสัมพันธ์ความเหนี่ยวนำซึ่งโครนัสเฉลี่ยกับกระแสฟิลต์.....	38
3.21	วงจรสวิตซ์ความเหนี่ยวนำ.....	39
3.22	แผนภาพการพัฒนาระบบกำลังไฟฟ้าอัลเทอร์เนเตอร์.....	40
3.23	แผนผังของวงจรควบคุมกระแสไฟฟ้าของอัลเทอร์เนเตอร์ (VCC).....	41
3.24	ระบบอัลเทอร์เนเตอร์และระบบควบคุมบนโปรแกรม Matlab/Simulink.....	41
3.25	ผลการทำงานวงจรควบคุมแรงดันและกระแสไฟฟ้าของอัลเทอร์เนเตอร์ บนโปรแกรม Matlab/Simulink.....	42
3.26	วงจรควบคุมแรงดันและกระแสไฟฟ้า (VCC) ของระบบอัลเทอร์เนเตอร์.....	43
3.27	โครงสร้างภายในไอซี SG3524N.....	44
3.28	การต่อส่วนขั้วมอเตอร์.....	46
3.29	การตั้งค่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง.....	47
3.30	แผนผังของตัวควบคุมแบบปริพันธ์.....	48
3.31	ผลตอบสนองต่อฟังก์ชันขั้นบันไดของตัวควบคุมแบบปริพันธ์.....	48
3.32	วงจรต้นแบบของการควบคุมแรงดันและกระแสไฟฟ้าของอัลเทอร์เนเตอร์.....	49

4.1	ความแตกต่างของค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จากผลการจำลองของกำลังไฟฟ้า อัลเทอร์เนเตอร์มากที่สุด ($P_{alt,max}$) เปรียบเทียบกับกำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตโดย อัลเทอร์เนเตอร์แบบล้นเดลล์ ในกรณีเลือกใช้ค่าความเหนี่ยวนำที่เป็นค่าคงที่....	52
4.2	กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตมากที่สุดของอัลเทอร์เนเตอร์ ($P_{alt,max}$) โดยที่เปลี่ยนแปลง ค่าภาระ 25 – 800 วัตต์.....	52
4.3	ผลการวัดและผลการจำลองของกำลังไฟฟ้ามากที่สุดที่ผลิตโดยอัลเทอร์เนเตอร์ ($P_{alt,max}$) เปรียบเทียบในกรณีเลือกใช้ค่าความเหนี่ยวนำซึ่งโครนัสคงที่กับค่า ความเหนี่ยวนำซึ่งโครนัสแปรผันเฉลี่ย	53
4.4	การเปรียบเทียบผลการวัดและผลการจำลองของกำลังไฟฟ้าอัลเทอร์เนเตอร์ .	54
4.5	กำลังไฟฟ้าอัลเทอร์เนเตอร์ที่มีการควบคุมแรงดันบัสไฟฟ้าค่าต่างๆ บน โปรแกรม Matlab/Simulink.....	56
4.6	การเปรียบเทียบผลการควบคุมกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตอัลเทอร์เนเตอร์ระหว่าง โวลต์เตจเร็กกูเลเตอร์กับวงจร VCC ในกรณีที่กระแสประจุไฟเข้าแบตเตอรี่ เท่ากับ 0 แอมป์.....	59
4.7	การเปรียบเทียบผลการควบคุมกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตอัลเทอร์เนเตอร์ระหว่าง โวลต์เตจเร็กกูเลเตอร์กับวงจร VCC ในกรณีที่กระแสประจุไฟเข้าแบตเตอรี่ เท่ากับ 0 แอมป์กับกรณีที่กระแสประจุไฟเข้าแบตเตอรี่เท่ากับ 5 แอมป์	60
4.8	ผลของกระแสฟิลต์ที่ถูกควบคุมด้วยวงจรโวลต์เตจเร็กกูเลเตอร์กับวงจร VCC ในกรณีที่กระแสประจุไฟเข้าแบตเตอรี่เท่ากับ 0 แอมป์ และ 5 แอมป์.....	61
4.9	ผลของแรงดันบัสไฟฟ้า (V_{bus}) เนื่องมาจากการทำงานของวงจร โวลต์เตจเร็กกูเลเตอร์กับวงจร VCC ในกรณีที่กระแสประจุไฟเข้าแบตเตอรี่ เท่ากับ 0 แอมป์ และ 5 แอมป์	62
4.10	รูปคลื่นสัญญาณแรมป์ (Ramp signal) ของสัญญาณควบคุมความกว้างของ พัลส์	63
4.11	รูปคลื่นกระแสฟิลต์ของดีซีชอปเปอร์ ที่ความต้องการกำลังไฟฟ้าของภาระ 160 วัตต์ ความเร็วรอบอัลเทอร์เนเตอร์ 1,500 รอบ/นาที	64
4.12	รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าของดีซีชอปเปอร์ ที่ความต้องการกำลังไฟฟ้าของภาระ 160 วัตต์ ความเร็วรอบอัลเทอร์เนเตอร์ 1,500 รอบ/นาที	64

4.13	รูปคลื่นแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำแต่ละเฟสของอัลเทอร์เนเตอร์ ณ ตำแหน่งก่อนเข้าวงจรเรียงกระแสเต็มบริจด์ที่ความต้องการกำลังไฟฟ้าของภาระ 160 วัตต์ ความเร็วรอบอัลเทอร์เนเตอร์ 1,500 รอบ/นาที	65
4.14	รูปคลื่นกระแสอัลเทอร์เนเตอร์ ณ ตำแหน่งขั้วของอัลเทอร์เนเตอร์ที่ความต้องการกำลังไฟฟ้าของภาระ 160 วัตต์ ความเร็วรอบอัลเทอร์เนเตอร์ 1,500 รอบ/นาที	66
4.15	ผลของกระแสฟิลต์ที่ถูกควบคุมด้วยวงจรคุมค่าแรงดันบัลและกระแสไฟฟ้าอัลเทอร์เนเตอร์ ที่ความต้องการกำลังไฟฟ้าของภาระต่างๆ ในกรณีที่กระแสประจุไฟเข้าแบตเตอรี่เท่ากับ 0 แอมป์	67
4.16	ความสัมพันธ์กระแสฟิลต์กับกระแสอัลเทอร์เนเตอร์โดยกำหนดให้กระแสประจุไฟเข้าแบตเตอรี่เท่ากับ 0 แอมป์ ที่ความเร็วรอบอัลเทอร์เนเตอร์ต่างๆ ...	67
4.17	ความสัมพันธ์กระแสฟิลต์กับกระแสอัลเทอร์เนเตอร์โดยกำหนดให้กระแสประจุไฟเข้าแบตเตอรี่เท่ากับ 5 แอมป์ ที่ความเร็วรอบอัลเทอร์เนเตอร์ต่างๆ ...	68
4.18	ผลการควบคุมกระแสฟิลต์ด้วยวงจร VCC ในกรณีที่กระแสประจุไฟเข้าแบตเตอรี่คงที่ 5 แอมป์ ขณะที่อัลเทอร์เนเตอร์ไม่ได้เชื่อมต่อกับภาระ	68
5.1	การแบ่งจ่ายพลังงานของระบบอัลเทอร์เนเตอร์	73
5.2	แผนที่ประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ชนิดกรดตะกั่ว	75
5.3	การจัดการด้านกำลังไฟฟ้าโดยกำหนดกฎ	75