

วิธีการประหยัดพลังงานในระบบขับเคลื่อนกระแสดตรง
ที่ใช้แหล่งพลังงานผสมผสาน

นาย เต้จ เผ่าละออ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2544
ISBN 974-533-065-5

**ENERGY SAVING MEANS IN DC DRIVE
WITH HYBRID ENERGY SOURCES**

Mr. Padej Pao-la-or

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Electrical Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2001
ISBN 974-533-065-5**

หัวข้อวิทยานิพนธ์

วิธีการประหยัดพลังงานในระบบขับเคลื่อนกระแสตรงที่ใช้แหล่งพลังงานผสมผสาน
(Energy Saving Means in DC Drive with Hybrid Energy Sources)

สภามหาวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.สราวุฒิ สุจิตจร)

ประธานกรรมการ/อาจารย์ที่ปรึกษา

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ไพโรจน์ สัตยธรรม)

กรรมการ

.....
(รองศาสตราจารย์ น.อ.ดร.สมโภชน์ ผิวเหลือง)

กรรมการ

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกชัย จันทสาโร)

กรรมการ

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ทวิช จิตรสมบูรณ์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

.....
(รองศาสตราจารย์ น.อ.ดร.วรพจน์ จำพิศ)

คณบดี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

เผด็จ เผ่าละออ : วิธีการประหยัดพลังงานในระบบขับเคลื่อนกระแสตรงที่ใช้แหล่งพลังงานผสมผสาน

(ENERGY SAVING MEANS IN DC DRIVE WITH HYBRID ENERGY SOURCES)

อ. ที่ปรึกษา : รศ. ดร. สราวุฒิ สุจิตจร, 176 หน้า.

ISBN 974-533-065-5

ระบบพลังงานผสมผสาน หมายถึงระบบที่มีการใช้แหล่งพลังงานต่างประเภทกันในระบบในงานวิจัยนี้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ต่อคู่ควบกับแบตเตอรี่ทำหน้าที่เป็นแหล่งพลังงานจ่ายให้มอเตอร์และปั๊มหอยโข่งที่เป็นโหลดของระบบอยู่เสมอ ส่วนแบตเตอรี่บางขณะเป็นแหล่งพลังงานบางขณะเป็นโหลด แผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานที่ขึ้นกับสภาพอากาศ ระบบเช่นนี้มีการใช้พลังงานในโหมดรวม นอกจากนี้ ส่วนประกอบต่างๆ มีลักษณะสมบัติไม่เป็นเชิงเส้น ทำให้ต้องใช้แบบจำลองที่ซับซ้อนและการจำลองผล

งานวิจัยนี้นำเสนอแบบจำลองของส่วนประกอบต่างๆ ในระบบพลังงานผสมผสาน เพื่อดำเนินการถ่ายโอนกำลังงานในระบบอย่างเหมาะสมที่สุด โดยการดำเนินงานจะต้องคำนึงถึงลักษณะสมบัติไม่เป็นเชิงเส้นของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ แบตเตอรี่ และมอเตอร์ต่อควบปั้มน้ำ การพิจารณาแบ่งออกเป็นกรณีการวินิจฉัยอัตราส่วนการแปลงพลังงานของ ดีซี/ดีซี คอนเวอร์เตอร์ เพื่อให้เกิดการถ่ายโอนกำลังงานได้สูงสุด และการวินิจฉัยอัตรากระแสขั้วมอเตอร์ในสภาวะที่จะเกิดการสูญเสียในมอเตอร์ต่ำที่สุด งานวิจัยนี้ยังอธิบายถึงโครงสร้างของโปรแกรมจำลองผล และผลจากการจำลองระบบ วัตถุประสงค์ของโปรแกรมจำลองผลเพื่อการออกแบบตัวควบคุมการประหยัดพลังงาน และเพื่อวิเคราะห์การใช้พลังงานในระบบ การออกแบบตัวควบคุม และการวิเคราะห์การใช้พลังงานได้รับการอธิบายไว้ในวิทยานิพนธ์

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2544

ลายมือชื่อนักศึกษา.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

PADEJ PAO-LA-OR : ENERGY SAVING MEANS IN DC DRIVE WITH HYBRID
ENERGY SOURCES THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. SARAWUT SUJITJORN,
Ph.D. 176 PP. ISBN 974-533-065-5

PHOTOVOLTAIC/OPTIMIZATION/LOSS MINIMIZATION/SIMULATION/
FUZZY LOGIC CONTROLLER

A hybrid-energy system means a system with mixed types of energy sources. In this, solar panels are coupled with batteries as sources for a motor with helical pump. The motor with pump always acts as load while batteries can be either source or load. The solar panels are weather dependent sources. Coupled modes of energy utilization together with component's nonlinearities lead to the requirement of complex modeling and simulation.

This research presents the models of components of a hybrid-energy system, and the results for optimization of power transfer in the system. Nonlinear characteristics of solar panels, batteries, and motor coupled with helical pump are taken into account. The transformation ratios for dc/dc converter are derived to achieve the maximum power transfer. Loss minimization for the motor is conducted to obtain the optimum driving current. Furthermore, the work includes simulation program, and simulation results. The developed simulation program is aimed to aid the design of energy saving controller, and the analysis of energy utilization of the system. The controller and the analysis are discussed in the thesis.

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา 2544

ลายมือชื่อนักศึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างยิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านดำเนินงานวิจัย จากบุคคล และกลุ่มบุคคลต่างๆ ได้แก่

รองศาสตราจารย์ ดร.สราวุฒิ สุจิตจร หัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา แนะนำ รวมทั้งกำลังใจ และแนะแนวทางอันเป็นประโยชน์แก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งเป็นแบบอย่างที่ดีในการดำเนินชีวิตหลายๆ ด้าน

รองศาสตราจารย์ ไพบุลย์ ไชยนิล อาจารย์ ดร.กิตติ อรรถกิจมงคล อาจารย์ ดร.อาทิตย์ ศรีแก้ว และ อาจารย์ ธนัชชัย กุลวรวานิชพงษ์ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่กรุณาให้คำปรึกษาด้านวิชาการ และให้กำลังใจมาโดยตลอด

ขอขอบคุณวิศวกรศูนย์เครื่องมือ คุณประพล จาระตะคุ คุณวิชัย ศรีสุรภัย และคุณประพันธ์ คัทวี รวมทั้งเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่ช่วยอำนวยความสะดวกทางด้านเครื่องมือต่างๆ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัย และในการเผยแพร่งานวิจัย

ขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ บัณฑิตศึกษาทุกท่าน ที่ให้กำลังใจในการทำวิจัยมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ ผู้เขียนขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ให้ความรู้ทางด้านวิชาการทั้งในอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้ความรัก กำลังใจ การอบรมเลี้ยงดู และดูแลส่งเสริมทางการศึกษาอย่างดีมาโดยตลอด จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา

เผด็จ เผ่าละออ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ.....	ซ

บทที่

1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	2
1.3 ข้อยกเว้นเบื้องต้น.....	3
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์.....	4
2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบพลังงานผสมผสาน.....	5
2.1 บทนำ.....	5
2.2 แบบจำลองแผงพีวี.....	5
2.2.1 วงจรสมมูลของแผงพีวี.....	5
2.2.2 ผลการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มแสงอาทิตย์.....	9
2.2.3 การคำนวณหาค่ากำลังงานสูงสุด.....	11
2.2.4 การนำมอดูลมาต่อร่วมกัน.....	11
2.3 แบบจำลองตัวควบคุมตามรอยกำลังงานสูงสุด.....	14
2.4 แบบจำลองแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด.....	14
2.4.1 ลักษณะสมบัติของแบตเตอรี่ชนิดสารกึ่ง.....	14

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4.2	ลักษณะสมบัติของแบตเตอรี่ชนิดชาร์จ.....	17
2.4.3	การนำแบตเตอรี่มาต่อร่วมกัน.....	19
2.5	แบบจำลองมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นฟิลด์แยกส่วน.....	20
2.6	แบบจำลองปั๊มหอยโข่ง.....	23
2.6.1	แรงบิดของปั๊มหอยโข่ง.....	23
2.6.2	ผลของมอเตอร์เมื่อขับปั๊มหอยโข่ง.....	24
2.6.3	การลดค่ากระแสอาร์เมเจอร์ขณะเริ่มเดินเครื่อง.....	25
2.6.4	ลักษณะสมบัติแรงดัน-กระแสของมอเตอร์เมื่อขับโหลด.....	27
2.7	แบบจำลองความเข้มแสงอาทิตย์.....	29
2.8	สรุป.....	32
3	การถ่ายโอนพลังงานในระบบอย่างเหมาะสมที่สุด.....	33
3.1	บทนำ.....	33
3.2	การหาค่ากำลังงานสูงสุดตลอดทั้งวันที่มีแสงอาทิตย์.....	33
3.2.1	ค่ากำลังงานสูงสุดเมื่อความเข้มแสงอาทิตย์เปลี่ยนแปลง.....	33
3.2.2	ค่ากระแสและแรงดันที่ทำให้เกิดกำลังงานสูงสุด.....	38
3.3	การหาค่าอัตราส่วนการแปลงที่เหมาะสม.....	39
3.3.1	แผงพีวีจ่ายพลังงานโดยตรงให้แก่มอเตอร์.....	39
3.3.2	แผงพีวีจ่ายพลังงานโดยตรงให้แก่แบตเตอรี่.....	42
3.3.3	แผงพีวีจ่ายพลังงานให้ทั้งมอเตอร์และแบตเตอรี่.....	44
3.4	การลดค่ากำลังงานสูญเสียในมอเตอร์ให้ต่ำสุด.....	47
3.5	สรุป.....	51
4	การออกแบบระบบพลังงานผสมผสาน.....	52
4.1	บทนำ.....	52
4.2	การคำนวณหาจำนวนของแบตเตอรี่ที่เหมาะสม.....	52

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3 การคำนวณหาจำนวนของแผงพีวีที่เหมาะสม.....	55
4.4 สรุป.....	57
5 พลวัตทางพลังงานของระบบพลังงานผสมผสาน.....	59
5.1 บทนำ.....	59
5.2 โครงสร้างและการพัฒนาโปรแกรมจำลองผล.....	59
5.3 การศึกษาพลวัตทางพลังงานด้วยการจำลองผล.....	66
5.4 สรุป.....	79
6 การออกแบบตัวควบคุมกำกับสั่งการโดยใช้ตรรกศาสตร์ฟัซซี่.....	80
6.1 บทนำ.....	80
6.2 ทฤษฎีฟัซซี่เซตและระบบควบคุมแบบฟัซซี่.....	80
6.3 การออกแบบตัวควบคุมกำกับสั่งการด้วยตรรกศาสตร์ฟัซซี่เพื่อการประหยัดพลังงาน.....	84
6.4 การทดสอบตัวควบคุมกำกับสั่งการแบบฟัซซี่ด้วยการจำลองผล.....	99
6.5 สรุป.....	106
7 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	108
7.1 สรุป.....	108
7.2 ข้อเสนอแนะ.....	109
เอกสารอ้างอิง.....	111
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. รายละเอียดโปรแกรมจำลองผลระบบพลังงาน.....	113
ภาคผนวก ข. รายละเอียดโปรแกรมจำลองผลตัวควบคุมกำกับสั่งการ.....	122
ภาคผนวก ค. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา.....	140
ประวัติผู้เขียน.....	176

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1	ค่ากำลังงานสูงสุดของแผงพีวี 200 มอดูล เมื่อความเข้มแสงเปลี่ยนแปลง.....35
3.2	การปรับค่า D_m ที่เหมาะสมเมื่อความเข้มแสงเปลี่ยนแปลง.....41
3.3	การปรับค่า D_b ที่เหมาะสมเมื่อความเข้มแสงเปลี่ยนแปลง.....43
3.4	การปรับค่า D_h ที่เหมาะสมเมื่อความเข้มแสงเปลี่ยนแปลง.....46

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 ระบบพลังงานผสมผสาน.....	5
2.2 วงจรสมมูลของแผงพีวี.....	6
2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกำลังไฟฟ้าของแผงพีวี.....	7
2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแสไฟฟ้าของแผงพีวี.....	8
2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับกำลังไฟฟ้าของแผงพีวี.....	8
2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกำลังไฟฟ้าเมื่อความเข้มแสงอาทิตย์เปลี่ยนแปลง.....	9
2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแสไฟฟ้าเมื่อความเข้มแสงอาทิตย์เปลี่ยนแปลง.....	10
2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับกำลังไฟฟ้าเมื่อความเข้มแสงอาทิตย์เปลี่ยนแปลง.....	10
2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกำลังไฟฟ้าเมื่อนำมอดูลต่อร่วมกัน.....	12
2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแสไฟฟ้าเมื่อนำมอดูลต่อร่วมกัน.....	13
2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับกำลังไฟฟ้าเมื่อนำมอดูลต่อร่วมกัน.....	13
2.12 แรงดันแบตเตอรี่ขณะดีสชาร์จ.....	16
2.13 แรงดันแบตเตอรี่ขณะชาร์จ.....	18
2.14 แรงดันแบตเตอรี่ขณะดีสชาร์จเมื่อนำแบตเตอรี่ต่อร่วมกัน.....	19
2.15 แรงดันแบตเตอรี่ขณะชาร์จเมื่อนำแบตเตอรี่ต่อร่วมกัน.....	20
2.16 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	21
2.17 ค่ากระแสอาร์เมเจอร์และความเร็วของมอเตอร์ขณะไว้โหลด.....	23
2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วของปั๊ม.....	24
2.19 ค่ากระแสอาร์เมเจอร์และความเร็วของมอเตอร์ขณะขับปั๊ม.....	24
2.20 คุณลักษณะของกระแสและความเร็วของมอเตอร์เมื่อมี R_{starter} ต่อร่วม.....	26
2.21 ลักษณะสมบัติแรงดัน-กระแสของมอเตอร์เมื่อขับโหลด.....	28
2.22 ผลการเปรียบเทียบลักษณะสมบัติแรงดัน-กระแสของมอเตอร์.....	29
2.23 ลักษณะของรูปพาราโบลาแรงจูงคว่ำ.....	30
2.24 ค่าความเข้มแสงอาทิตย์ในหนึ่งวัน.....	32

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกำลังไฟฟ้าของแผงฟิวิ 200 มอดูล เมื่อความเข้มแสงเปลี่ยนแปลง.....	34
3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแสไฟฟ้าของแผงฟิวิ 200 มอดูล เมื่อความเข้มแสงเปลี่ยนแปลง.....	34
3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสโฟโตกับกระแสที่ทำให้เกิดกำลังงานสูงสุด.....	36
3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสโฟโตกับแรงดันที่ทำให้เกิดกำลังงานสูงสุด.....	37
3.5 ค่ากระแสที่ทำให้เกิดกำลังงานสูงสุดตลอดทั้งวันที่มีแสง.....	38
3.6 ค่าแรงดันที่ทำให้เกิดกำลังงานสูงสุดตลอดทั้งวันที่มีแสง.....	39
3.7 ค่า D_m ที่ทำให้เกิดกำลังงานสูงสุดในแต่ละความเข้มแสง.....	40
3.8 ค่า D_0 ที่ทำให้เกิดกำลังงานสูงสุดในแต่ละความเข้มแสง.....	44
3.9 ค่า D_h ที่ทำให้เกิดกำลังงานสูงสุดในแต่ละความเข้มแสง.....	45
3.10 ผลการเปรียบเทียบแรงดันและกระแสอาร์เมเจอร์เมื่อพิจารณาค่ากำลังงานสูญเสียให้ต่ำสุด.....	49
3.11 กระแสอาร์เมเจอร์ที่ทำให้เกิดกำลังงานขาเข้าของมอเตอร์ต่ำที่สุด.....	50
4.1 การดิสชาร์จพลังงานของแบตเตอรี่ให้แก่มอเตอร์.....	53
4.2 อุปกรณ์ควบคุมการประจุแบตเตอรี่.....	54
4.3 ลักษณะสมบัติของแบตเตอรี่ชนิดชาร์จ.....	55
4.4 คุณลักษณะของกระแสในการชาร์จแบตเตอรี่แต่ละชุด.....	56
4.5 การเปรียบเทียบระหว่างกำลังงานที่แผงฟิวิผลิตได้กับกำลังงานที่มอเตอร์และแบตเตอรี่ต้องใช้.....	57
5.1 ค่าความเข้มแสงอาทิตย์ในหนึ่งวัน แสดงเป็นร้อยละของวันที่ฟ้าเปิด.....	60
5.2 ค่ากระแสที่ทำให้เกิดกำลังงานสูงสุดตลอดทั้งวันที่มีแสงแสดงเป็นร้อยละของวันที่ฟ้าเปิด.....	61
5.3 ค่าแรงดันที่ทำให้เกิดกำลังงานสูงสุดตลอดทั้งวันที่มีแสงแสดงเป็นร้อยละของวันที่ฟ้าเปิด.....	61

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5.4	แผนภูมิแสดงโครงสร้างของโปรแกรมจำลองผลระบบพลังงานผสมผสาน.....62
5.5	พลวัตทางด้านกระแสของระบบกรณีความเข้มแสงอาทิตย์เป็น 100% ของวันที่ฟ้าเปิด.....67
5.6	พลวัตทางด้านแรงดันของระบบกรณีความเข้มแสงอาทิตย์เป็น 100% ของวันที่ฟ้าเปิด.....68
5.7	พลวัตทางด้านกำลังงานของระบบกรณีความเข้มแสงอาทิตย์เป็น 100% ของวันที่ฟ้าเปิด....68
5.8	พลวัตทางด้านกระแสของระบบกรณีความเข้มแสงอาทิตย์เป็น 80% ของวันที่ฟ้าเปิด.....71
5.9	พลวัตทางด้านแรงดันของระบบกรณีความเข้มแสงอาทิตย์เป็น 80% ของวันที่ฟ้าเปิด.....72
5.10	พลวัตทางด้านกำลังงานของระบบกรณีความเข้มแสงอาทิตย์เป็น 80% ของวันที่ฟ้าเปิด.....72
5.11	พลวัตทางด้านกระแสของระบบกรณีความเข้มแสงอาทิตย์เป็น 70% ของวันที่ฟ้าเปิด.....74
5.12	พลวัตทางด้านแรงดันของระบบกรณีความเข้มแสงอาทิตย์เป็น 70% ของวันที่ฟ้าเปิด.....74
5.13	พลวัตทางด้านกำลังงานของระบบกรณีความเข้มแสงอาทิตย์เป็น 70% ของวันที่ฟ้าเปิด.....75
5.14	พลวัตทางด้านกระแสของระบบกรณีความเข้มแสงอาทิตย์เป็น 50% ของวันที่ฟ้าเปิด.....77
5.15	พลวัตทางด้านแรงดันของระบบกรณีความเข้มแสงอาทิตย์เป็น 50% ของวันที่ฟ้าเปิด.....77
5.16	พลวัตทางด้านกำลังงานของระบบกรณีความเข้มแสงอาทิตย์เป็น 50% ของวันที่ฟ้าเปิด.....78
6.1	ความแตกต่างของสมาชิกภาพระหว่างเซตดั้งเดิมกับพีชชีเซต.....81
6.2	ตัวอย่างของฟังก์ชันความเป็นสมาชิก.....82
6.3	ลักษณะพื้นฐานของระบบควบคุมแบบพีชชี.....83
6.4	ฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพของกระแสที่ผลิตได้จากแผงพีวี.....86
6.5	ฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพของแรงดันที่ผลิตได้จากแผงพีวี.....88
6.6	ฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพของกระแสที่มอเตอร์และแบตเตอรี่ต้องการ.....89
6.7	แผนภูมิแสดงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมจำลองผลตัวควบคุม.....97
6.8	พลวัตทางด้านกระแสของระบบเมื่อมีตัวควบคุมในกรณีความเข้มแสงอาทิตย์เป็น 100% ของวันที่ฟ้าเปิด.....101
6.9	พลวัตทางด้านแรงดันของระบบเมื่อมีตัวควบคุมในกรณีความเข้มแสงอาทิตย์เป็น 100% ของวันที่ฟ้าเปิด.....101

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
6.10 พลวัตทางด้านกระแสของระบบเมื่อมีตัวควบคุมในกรณีความเข้มแสงอาทิตย์เป็น 70% ของวันที่ฟ้าเปิด.....	103
6.11 พลวัตทางด้านแรงดันของระบบเมื่อมีตัวควบคุมในกรณีความเข้มแสงอาทิตย์เป็น 70% ของวันที่ฟ้าเปิด.....	103
6.12 พลวัตทางด้านกระแสของระบบเมื่อมีตัวควบคุมในกรณีความเข้มแสงอาทิตย์เป็น 50% ของวันที่ฟ้าเปิด.....	105
6.13 พลวัตทางด้านแรงดันของระบบเมื่อมีตัวควบคุมในกรณีความเข้มแสงอาทิตย์เป็น 50% ของวันที่ฟ้าเปิด.....	105

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พลังงานเป็นสิ่งจำเป็นพื้นฐานทั้งทางตรงและทางอ้อมของสิ่งมีชีวิต กิจกรรมทุกระดับของมนุษย์ต้องใช้พลังงานแทบทั้งสิ้น รูปแบบของพลังงานที่ใช้กันมากคือ ความร้อน และไฟฟ้า แหล่งกำเนิดพลังงานหลักๆ ในปัจจุบันคือน้ำมัน ถ่านหิน และก๊าซธรรมชาติ มีปริมาณจำกัด อีกทั้งยังสร้างปัญหามลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม รวมถึงทำลายชั้นบรรยากาศของโลกด้วย ดังนั้นจึงควรวางแนวทางในการแก้ไข โดยพยายามหาแหล่งพลังงานทดแทนอื่นๆ ในบรรดาแหล่งพลังงานทดแทนต่างๆ นั้น พลังงานแสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานที่น่าสนใจกว่าแหล่งอื่นๆ อันเนื่องมาจากพลังงานที่แปลงได้อยู่ในรูปของพลังงานไฟฟ้าโดยตรง เป็นพลังงานที่สะอาดไม่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมและเป็นแหล่งพลังงานที่มีอยู่ทั่วไป ไม่มีวันหมดสิ้น หรืออาจใช้เวลาหลายพันล้านปีกว่าจะหมดสิ้นไป อีกทั้งประเทศไทยมีแสงอาทิตย์มากตลอดทั้งปี และค่าความเข้มแสงอาทิตย์ในรอบปีก็มีการเปลี่ยนแปลงไม่มาก ดังนั้น จึงเป็นผลคืออย่างยิ่งที่จะนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์ในด้านการอนุรักษ์พลังงาน

การแปลงพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า อาศัยเซลล์แสงอาทิตย์ที่อยู่ในรูปของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งต่อไปนี้จะเรียกโดยย่อว่าแผงพีวี (photovoltaic panel) แผงพีวีมีลักษณะการใช้งานไม่ยุ่งยาก เพราะให้เอาต์พุตไม่เป็นเชิงเส้น ผันแปรไปตามโหลด ปริมาณแสงที่กระทบและอุณหภูมิในสภาพแวดล้อม อีกทั้งแผงพีวีมีจุดการทำงานของแรงดันและกระแสเอาต์พุตช่วงกว้างมาก แต่จุดที่ให้กำลังงานสูงสุดมีเพียงแก่จุดเดียว ดังนั้นปัญหาที่พบคือ จุดการทำงานของโหลดอยู่ห่างจากจุดที่แผงพีวีให้กำลังงานสูงสุด ซึ่งจะทำให้ใช้ประโยชน์จากกำลังงานที่ผลิตได้ไม่เต็มที่ อีกทั้งระบบพลังงานแสงอาทิตย์เองก็มีราคาแพงและประสิทธิภาพยังไม่สูงมากนัก แต่เนื่องจากในปัจจุบันแผงพีวีเป็นเพียงทางเลือกเดียว สำหรับการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าเพื่อใช้ประโยชน์ การใช้แผงพีวีจึงต้องให้มั่นใจถึงการลงทุนอย่างคุ้มค่าและเหมาะสมที่สุด

งานวิจัยที่นำเสนอนี้ สนใจระบบพลังงานแสงอาทิตย์ที่สามารถปฏิบัติงานได้ตลอด 24 ชั่วโมงอย่างอิสระ (stand-alone) เพื่อประโยชน์ต่อการใช้งานในพื้นที่ทุรกันดารที่จำเป็น เช่น สถานพยาบาล สถานีอนามัย ที่อาจมีเหตุการณ์ฉุกเฉิน หรือแม้กระทั่งแหล่งท่องเที่ยวตามอุทยานต่างๆ การที่จะบรรลุวัตถุประสงค์ดังกล่าว จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องมีแหล่งพลังงานสำรองให้แก่แผงพีวี เมื่อ

พิจารณาถึงความต้องการของระบบดังกล่าวสำหรับประเทศกำลังพัฒนา แหล่งพลังงานที่นำเชื้อถ่านและราคาถูก คงเป็นแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด (lead-acid battery) ซึ่งใช้กันทั่วไปในรถยนต์ โดยต้องยอมรับเรื่องความยุ่งยากในการบำรุงรักษา และลักษณะสมบัติทางพลวัตที่ไม่เป็นเชิงเส้นอย่างมากของแบตเตอรี่ จากการใช้แหล่งพลังงานที่เป็นแผงโซลาร์เซลล์และแบตเตอรี่อยู่ในระบบเดียวกันดังกล่าว จึงเรียกระบบเช่นนี้ว่าระบบพลังงานผสมผสาน (hybrid energy system) โดยมีโหนดเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นฟิลด์แยกส่วนต่อควมบีบอัด (centrifugal pump) การจะทำความเข้าใจให้ได้ถึงพลวัตของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นเช่นนี้ คงต้องอาศัยความรู้ด้านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบ งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงกล่าวถึงรายละเอียดของแบบจำลองที่ต่อควมกันเข้าเป็นระบบพร้อมระบุค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ให้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้โดยตรง เพื่อนำไปสู่การพิจารณาถึงการใช้พลังงานอย่างเหมาะสมที่สุด (optimization) ในระบบ ด้วยการกล่าวถึงรายละเอียดการหาค่าอัตราส่วนการแปลงพลังงานของ ดีซี/ดีซีคอนเวอร์เตอร์ ที่มีความสามารถในการถ่ายโอนกำลังงานเอาต์พุตจากแผงโซลาร์เซลล์ได้สูงสุด และทำการลดค่ากำลังงานสูญเสียต่างๆ ในมอเตอร์ให้ต่ำที่สุด โดยมีวัตถุประสงค์ในการประหยัดพลังงาน งานวิจัยยังได้อธิบายถึงการออกแบบจำนวนของแผงโซลาร์เซลล์และแบตเตอรี่ที่เหมาะสม รวมทั้งทำการจำลองผลระบบด้วยคอมพิวเตอร์บนรากฐานของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ถูกต้อง โดยได้อธิบายถึงโครงสร้างของโปรแกรมจำลองผลตลอดจนแสดงผลที่ได้จากการใช้งานโปรแกรม ซึ่งพัฒนาขึ้นด้วย BORLAND C++™ โดยมีวัตถุประสงค์ของการพัฒนาโปรแกรมจำลองผลเพื่อใช้ประโยชน์สำหรับการออกแบบและอนุวัตตัวควบคุมกำกับสั่งการ (supervisory controller) โดยใช้ตรรกศาสตร์ฟัซซี่ (fuzzy logic) ในการควบคุมและจัดการพลังงาน และการวิเคราะห์การใช้พลังงานในระบบ เพื่อให้ได้ระบบพลังงานผสมผสานที่มีประสิทธิภาพสูงเชิงการใช้พลังงาน

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

- เพื่อการอนุรักษ์พลังงาน
- เพื่อหาหนทางเพิ่มประสิทธิภาพและความเชื่อถือได้ของระบบพลังงานผสมผสานสำหรับใช้งานได้เป็นเอกเทศ
- เพื่อพัฒนาอัลกอริทึมการควบคุมและจัดการ การใช้พลังงานในระบบ
- เพื่อพัฒนาเทคโนโลยีนำไปสู่การพึ่งพาตนเองอย่างยั่งยืน
- เพื่อพัฒนาระบบวิศวกรรมต้นแบบที่เหมาะสมต่อการใช้ประโยชน์จริงในชีวิตประจำวัน

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

- การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแผงพีวี จะไม่พิจารณาถึงค่าความต้านทานขนานรอยต่อ p-n เนื่องจากมีค่าใหญ่มาก และไม่พิจารณาถึงค่าความต้านทานในเนื้อสารกึ่งตัวนำและจุดเชื่อมต่อ เนื่องจากมีค่าน้อยมาก อีกทั้งกำหนดให้อุณหภูมิของแผงพีวีคงที่อยู่ตลอด

- การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแบตเตอรี่ จะไม่คำนึงถึงผลกระทบของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง และสมการแรงดันของแบตเตอรี่ขณะชาร์จและดิสชาร์จ จะไม่นำสถานะชั่วคราว (transient state) มาพิจารณา เพราะเป็นช่วงเวลาที่สั้นมาก

- การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง จะพิจารณาว่าวงจรทางด้านฟิลต์ไม่มีการอิ่มตัวเกิดขึ้น

- แผงพีวีทุกมอดูลและแบตเตอรี่ทุกลูก จะมีลักษณะสมบัติเหมือนกันทุกประการ

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

- พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบขับเคลื่อนทางไฟฟ้าสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งมีโหลดต่อประกอบ มีแหล่งพลังงานเป็นแผงพีวีและแบตเตอรี่ ที่สามารถใช้งานได้ตลอด 24 ชั่วโมงอย่างอิสระ

- ดำเนินการวิเคราะห์หาค่าอัตราส่วนการแปลงพลังงานของ ดิซี/ดิซี คอนเวอร์เตอร์ ให้มีความสามารถในการถ่ายโอนพลังงานจากแผงพีวีได้สูงสุด

- หาหนทางลดการสูญเสียกำลังงานต่างๆ ของมอเตอร์ให้เหลือน้อยที่สุด

- พัฒนาโปรแกรมจำลองผลระบบด้วย BORLAND C++™

- พัฒนาระบบควบคุมและสั่งการ การถ่ายโอนพลังงานระหว่างอุปกรณ์ต่างๆ ให้เป็นไปอย่างเหมาะสมและมีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- ได้โปรแกรมจำลองผลระบบพลังงานผสมผสานที่สามารถนำไปประยุกต์เข้ากับปัญหาจริงในการออกแบบและวิเคราะห์การใช้พลังงาน

- ได้ตัวควบคุมแบบกำกับสั่งการเพื่อจัดการพลังงานแก่ระบบต้นแบบ

- ได้ข้อสรุปอันเป็นประโยชน์เกี่ยวกับการใช้งานระบบพลังงานผสมผสาน

1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย 7 บท และ 3 ภาคผนวก บทที่ 1 เป็นบทนำ กล่าวถึงความสำคัญ ของปัญหา วัตถุประสงค์และเป้าหมายของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ รวมทั้งขอบเขตของงาน ส่วนบท อื่นๆ ประกอบด้วยเนื้อหา ดังต่อไปนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบ อันประกอบด้วย แผงพีวี แบตเตอรี่ ตัวควบคุมตามรอยกำลังงานสูงสุด มอเตอร์ต่อควบบีบีเอ็มน้ำ รวมทั้งความเข้ม แสงอาทิตย์

บทที่ 3 อธิบายถึงการถ่ายโอนกำลังงานในระบบอย่างเหมาะสมที่สุด การพิจารณาแบ่งออก เป็นการวิเคราะห์อัตราส่วนการแปลงพลังงานของ ดีซี/ดีซี คอนเวอร์เตอร์ และการวิเคราะห์อัตรา กระแสขั้วมอเตอร์ในสภาวะที่เกิดการสูญเสียในมอเตอร์ต่ำที่สุด

บทที่ 4 มีเนื้อหาว่าด้วย การออกแบบจำนวนของแผงพีวีและแบตเตอรี่ที่ต่ออนุกรมหรือ ขนานกันในระบบอย่างเหมาะสม

บทที่ 5 กล่าวถึงโครงสร้างของโปรแกรมจำลองผลระบบพลังงาน ที่พัฒนาขึ้นด้วยภาษา C ตลอดจนแสดงผลที่ได้จากการจำลองระบบ เพื่อวิเคราะห์ถึงพลวัตทางพลังงานในระบบ

บทที่ 6 มีเนื้อหาว่าด้วย การออกแบบและอนุวัตตัวควบคุมกำกับสั่งการด้วยตรรกศาสตร์ ฟัชซีเพื่อควบคุมและจัดการพลังงาน และทดสอบเพื่อศึกษาและเปรียบเทียบถึงข้อดีของการมีตัว ควบคุมด้วยวิธีการจำลองผล

บทที่ 7 เป็นบทสรุปและข้อเสนอแนะ

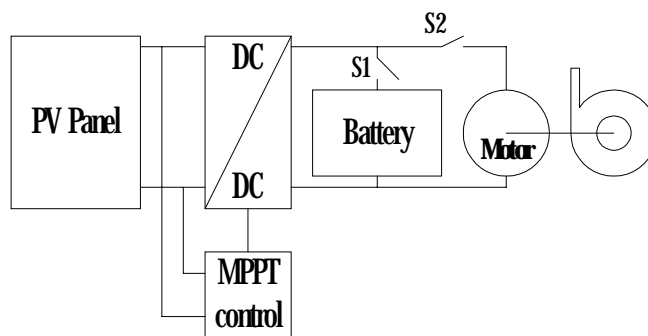
ภาคผนวกมีด้วยกัน 3 ส่วน ได้แก่ ภาคผนวก ก. แสดงรายละเอียดของโปรแกรมจำลองผล ระบบพลังงานที่พัฒนาขึ้น ภาคผนวก ข. แสดงรายละเอียดของโปรแกรมจำลองผลตัวควบคุมกำกับ สั่งการแบบฟัชซีเพื่อวิเคราะห์และเปรียบเทียบการใช้พลังงานในระบบ และภาคผนวก ค. เป็นการ รวมบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ผลงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้

บทที่ 2

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบพลังงานผสมผสาน

2.1 บทนำ

ระบบพลังงานผสมผสานมีองค์ประกอบดังแสดงในภาพที่ 2.1 ซึ่งประกอบด้วย แหล่งจ่ายพลังงานได้แก่ แผงโซลาร์ เป็นแหล่งพลังงานที่ขึ้นกับสภาพอากาศ แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด ซึ่งเป็นได้ทั้งแหล่งจ่ายพลังงานสำรองและโหลดที่มีลักษณะสมบัติไม่เป็นเชิงเส้น และมีมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงพร้อมปั๊มหอยโข่งเป็นโหลดพร้อมใช้งาน การใช้งานแผงโซลาร์อย่างคุ้มค่าต้องพึ่งพาชุดควบคุมตามรอยกำลังงานสูงสุด (MPPT control) และ ดิซี/ดิซี คอนเวอร์เตอร์ เพื่อจัดให้มีกำลังไฟสูงสุดเป็นเอาต์พุตจากแหล่งพลังงานเหลือเกินระบบ องค์ประกอบต่างๆ ของระบบพลังงานผสมผสานมีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ดังรายละเอียดที่จะได้กล่าวถึงต่อไปตามลำดับ



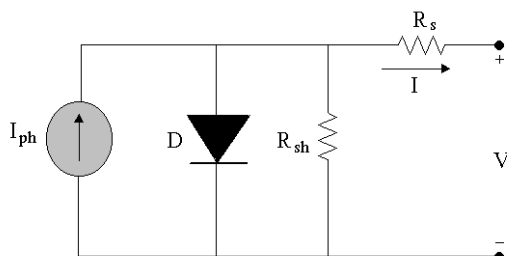
ภาพที่ 2.1 ระบบพลังงานผสมผสาน

2.2 แบบจำลองแผงโซลาร์

2.2.1 วงจรสมมูลของแผงโซลาร์

แผงโซลาร์หมายถึง อุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์จำนวนมาก ที่ได้รับการสร้างประกอบขึ้นรวมกันเป็นแผงเพื่อให้เหมาะแก่การใช้งาน แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแผงโซลาร์ ศึกษาได้จากวงจรสมมูลของแผงโซลาร์ (Hussein, Muta, Hoshino, and Osakada, 1995) ซึ่งแสดงได้ดังภาพที่ 2.2 ปกติความต้านทานขนานรอยต่อ p-n (R_{sh}) จะมีขนาดใหญ่่มาก และความต้านทานในเนื้อสารกึ่งตัวนำและจุดเชื่อมต่อ (R_s) จะมีขนาดเล็กน้อยมาก จึงไม่นำมาพิจารณาในการหาแบบจำลอง

ทางคณิตศาสตร์ที่แสดงความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของแผงพีวีจึงแสดงได้ดังสมการที่ (2-1)



ภาพที่ 2.2 วงจรสมมูลของแผงพีวี

$$I = n_p I_{ph} - n_p I_{rs} \left[\exp\left(\frac{qV}{kTAn_s}\right) - 1 \right] \quad (2-1)$$

- ซึ่ง
- I_{ph} คือ กระแสโฟโต (A)
 - I_{rs} คือ กระแสอิ่มตัวย้อนกลับ (A)
 - n_p คือ จำนวนมอดูลที่ต่อขนานกัน
 - n_s คือ จำนวนเซลล์ที่ต่ออนุกรมกัน
 - q คือ ค่าประจุอิเล็กตรอน ($1.6 \cdot 10^{-19}$ C)
 - k คือ ค่าคงที่โบลทซ์มันน์ ($1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K)
 - A คือ ค่าตัวประกอบของรอยต่อ p-n
 - T คือ อุณหภูมิของเซลล์ (K)

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแผงพีวี ใช้แผงพีวีของซีเมนส์ SP-75W (Pan, Chen, Chu, and Huang, 1999) มอดูลหนึ่งประกอบด้วยเซลล์แสงอาทิตย์จำนวนทั้งหมด 36 เซลล์ต่ออนุกรมกัน และ มีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ แสดงได้ดังนี้

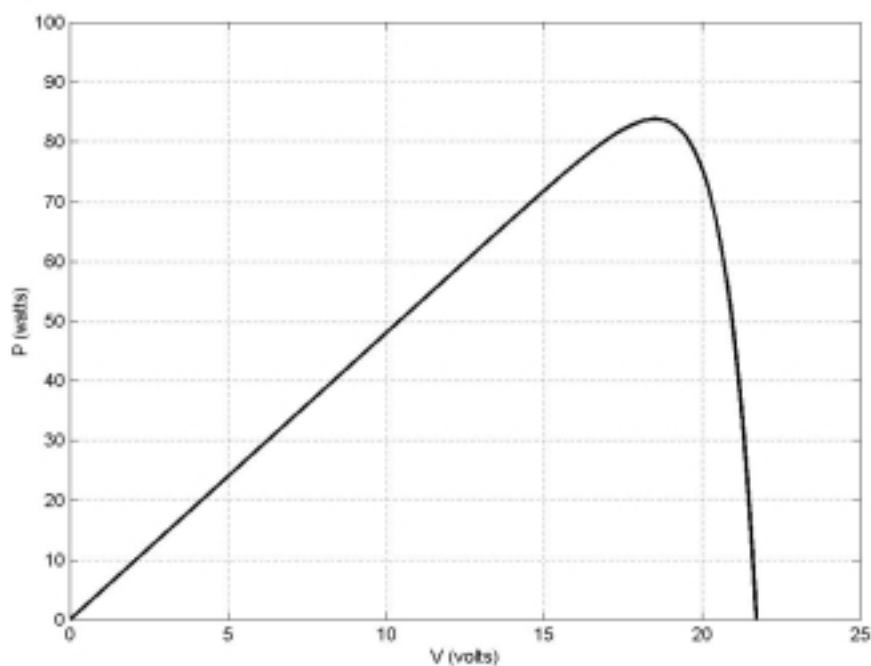
- ความเข้มแสง 1000 W/m^2 (peak power)
- อุณหภูมิ 25°C (298 K)
- $A = 1.2$, $I_{ph} = 4.8 \text{ A}$, $R_s \approx 0 \Omega$
- กำลังไฟฟ้าพิกัด 75 W
- กระแสพิกัด 4.4 A

- แรงดันพิกัด 14–17 V
- แรงดันขณะเปิดวงจร 21.7 V

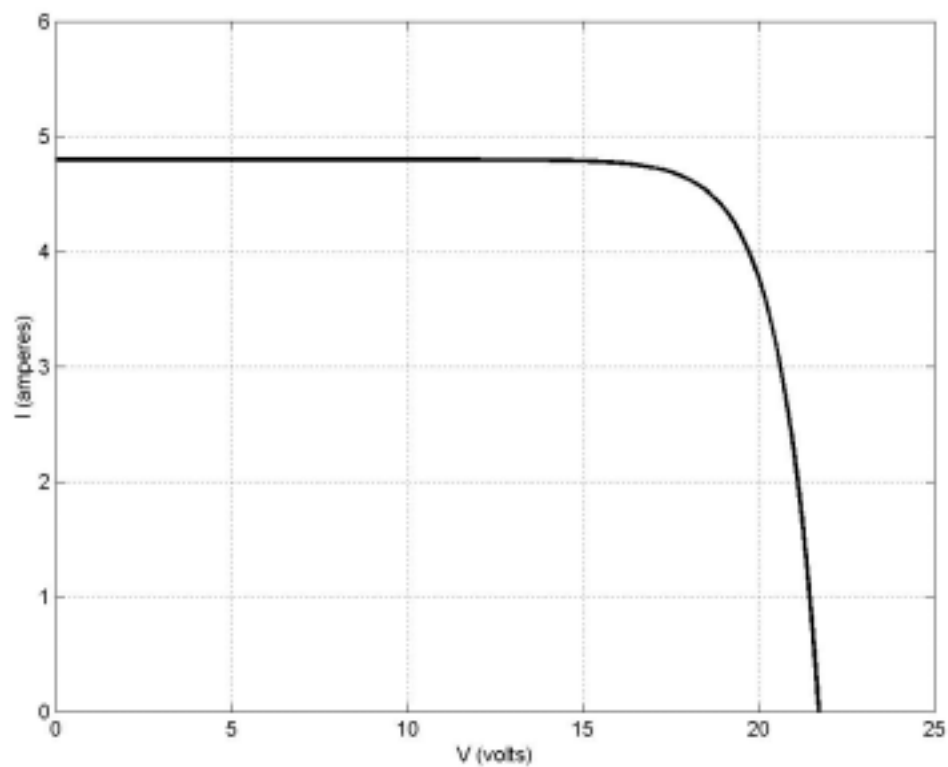
กรณีแผงพีวี SP-75W จึงมีค่า $n_s = 36$ ขณะที่ $n_p = 1$ โดยจะสมมติให้อุณหภูมิของแผงพีวีคงที่ตลอด จากสมการที่ (2-1) เมื่อแผงพีวีไม่มีโหลด สามารถคำนวณหาค่า I_{rs} ได้จากสมการที่ (2-2) โดยการทราบค่าแรงดันขณะเปิดวงจร (V_{oc}) ซึ่งที่จุดนี้เราทราบว่า ค่ากระแสเอาต์พุตของแผงพีวีมีค่าเป็นศูนย์

$$I_{rs} = \frac{I_{ph}}{\left[\exp\left(\frac{qV_{oc}}{kTAn_s}\right) - 1 \right]} \quad (2-2)$$

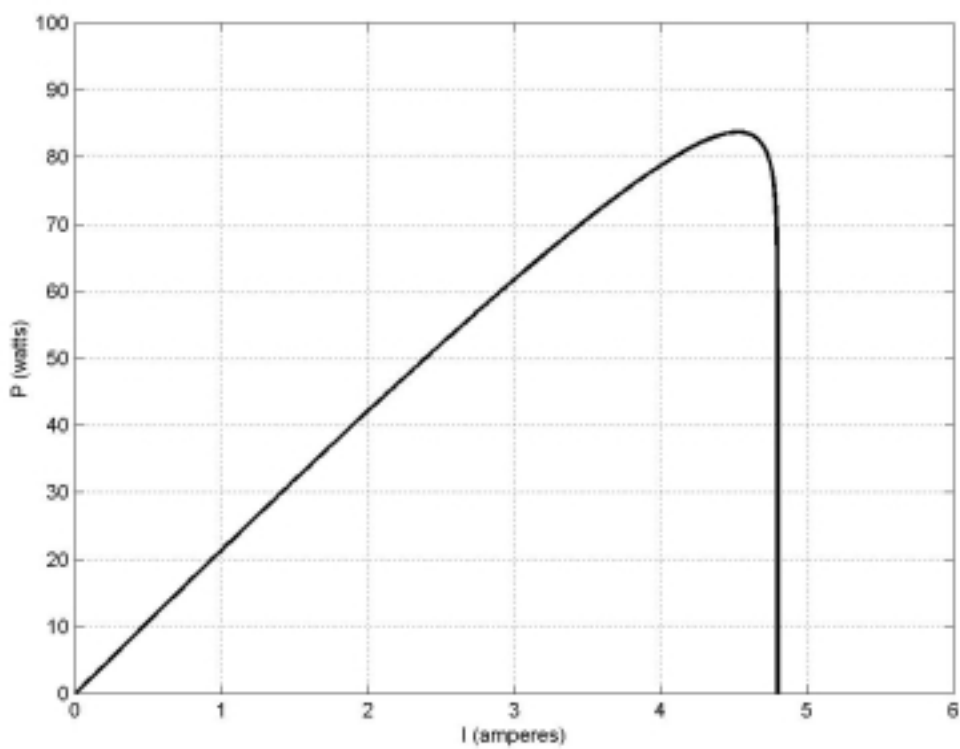
ดังนั้นจึงได้ค่า $I_{rs} = 1.5619 \cdot 10^{-8}$ A ค่า I_{rs} จะไม่เปลี่ยนแปลงในกรณีที่นำมอดูลมาต่ออนุกรมกัน เนื่องจากอัตราการเปลี่ยนแปลงของ V_{oc} เป็นสัดส่วนกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของ n_s พอดี และค่า I_{rs} จะไม่เปลี่ยนแปลงในกรณีที่นำมอดูลมาต่อขนานกัน เนื่องจากในสมการที่ (2-2) ไม่มีเทอม n_p เข้ามาเกี่ยวข้องในสมการ จากสมการที่ (2-1) จึงได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกำลังไฟฟ้า แรงดันกับกระแสไฟฟ้า และกระแสกับกำลังไฟฟ้าของแผงพีวี ดังภาพที่ 2.3, 2.4 และ 2.5 ตามลำดับ



ภาพที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกำลังไฟฟ้าของแผงพีวี



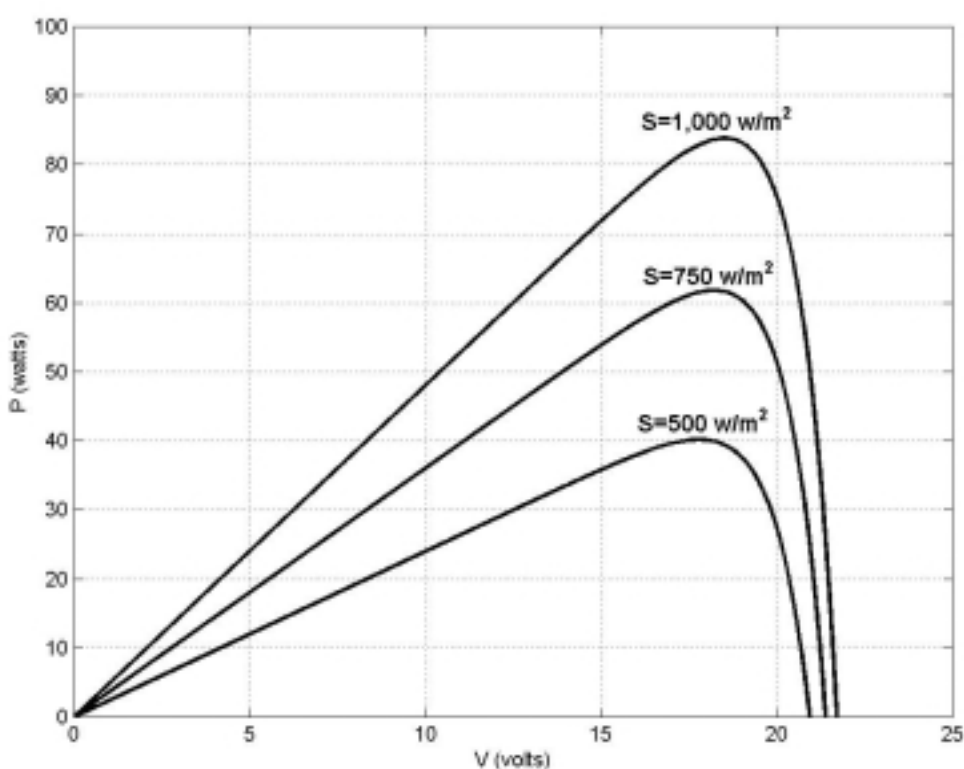
ภาพที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแสไฟฟ้าของแผงฟิวิ



ภาพที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับกำลังไฟฟ้าของแผงฟิวิ

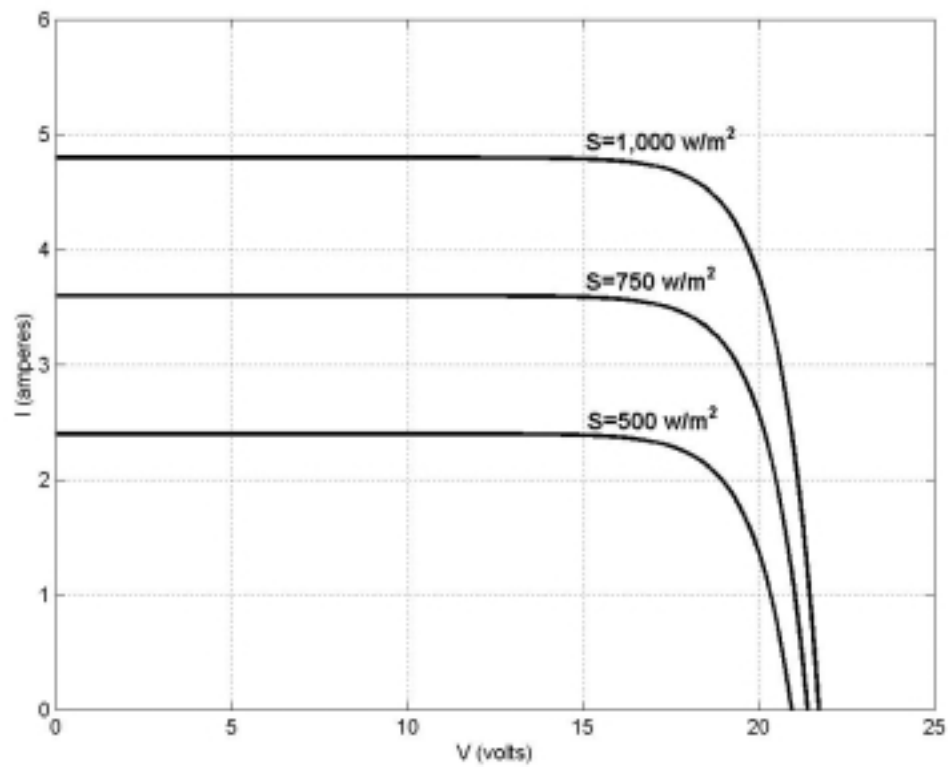
2.2.2 ผลการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มแสงอาทิตย์

ค่าความเข้มแสงอาทิตย์ (insolation: S) จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่า I_{ph} (Applebaum, 1988) ดังนั้นเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่า S ให้มีค่าลดลงจาก 1000 W/m^2 จะส่งผลให้ค่า I_{ph} จาก 4.8 A มีค่าลดลงเป็นสัดส่วนตามไปด้วย โดยค่าของ I_{rs} ยังคงมีค่าคงที่เนื่องจากเราสมมติให้อุณหภูมิของแผงพีวีที่ ดังนั้น ถ้ากำหนดให้ S มีค่าลดลงเป็น 750 W/m^2 จะได้ค่า I_{ph} ที่สอดคล้องเท่ากับ 3.6 A และถ้า S มีค่าลดลงเป็น 500 W/m^2 จะได้ค่า I_{ph} ที่สอดคล้องเท่ากับ 2.4 A จากนั้นทำการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกำลังไฟฟ้า แรงดันกับกระแสไฟฟ้า และกระแสกับกำลังไฟฟ้าของแผงพีวีเมื่อความเข้มแสงเปลี่ยนแปลงไปได้ดังภาพที่ 2.6, 2.7 และ 2.8 ตามลำดับ

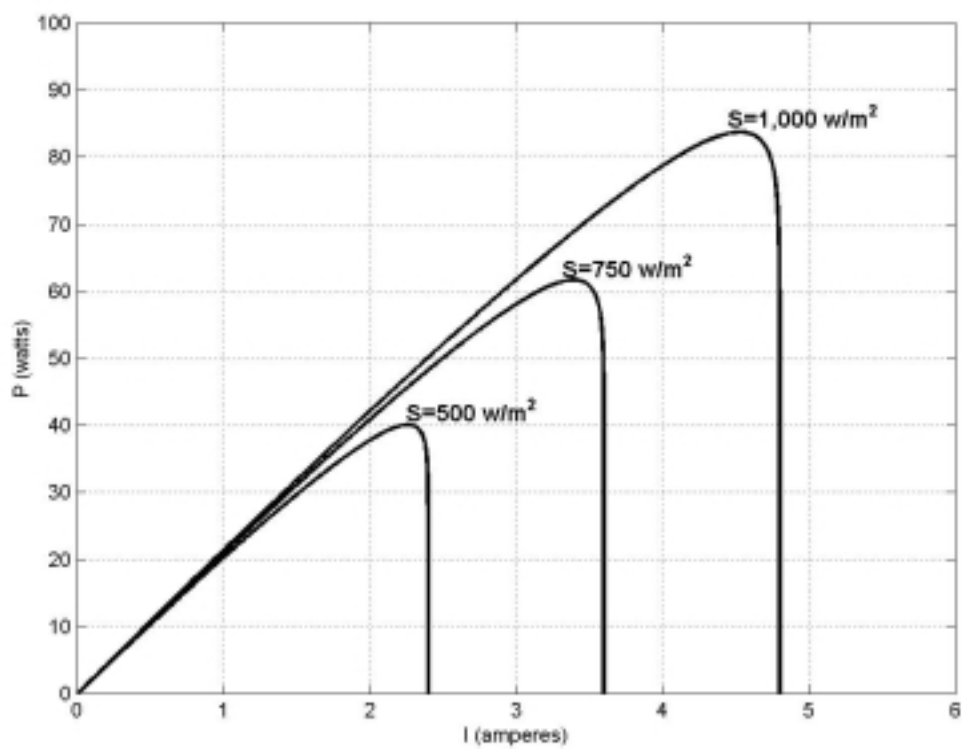


ภาพที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกำลังไฟฟ้าเมื่อความเข้มแสงอาทิตย์เปลี่ยนแปลง

จากภาพที่ 2.6, 2.7 และ 2.8 จะสังเกตเห็นว่า เมื่อความเข้มแสงอาทิตย์ลดลง จะส่งผลให้กำลังงานเอาต์พุตของแผงพีวีมีค่าลดลงตามไปด้วย และเมื่อความเข้มแสงอาทิตย์เปลี่ยนแปลงไป แรงดันเอาต์พุตจะมีค่าเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย เมื่อเทียบกับค่ากระแสเอาต์พุตของแผงพีวีที่เปลี่ยนแปลง



ภาพที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแสไฟฟ้าเมื่อความเข้มแสงอาทิตย์เปลี่ยนแปลง



ภาพที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับกำลังไฟฟ้าเมื่อความเข้มแสงอาทิตย์เปลี่ยนแปลง

2.2.3 การคำนวณหาค่ากำลังงานสูงสุด

แผงพีวีมีจุดการทำงานของแรงดันและกระแสเอาต์พุตช่วงกว้างมาก แต่จุดที่ให้กำลังงานสูงสุดที่ความเข้มแสงต่างๆ มีแค่เพียงจุดเดียวเท่านั้น ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการคำนวณหาค่ากำลังงานสูงสุด ณ จุดนี้ กำลังงานสูงสุดสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของแผงพีวีดังสมการที่ (2-1) โดยจากสมการที่ (2-1) เราสามารถคำนวณหาค่ากำลังงาน (P) ของแผงพีวีได้ดังสมการที่ (2-3) จากนั้นทำการหาอนุพันธ์อันดับหนึ่งเทียบกับ V โดยให้มีค่าเท่ากับศูนย์ ($dP/dV = 0$) ซึ่งจะได้ผลลัพธ์ดังสมการที่ (2-4) โดย $V_{P_{max}}$ คือ แรงดันที่ทำให้เกิดกำลังงานสูงสุด เราสามารถแก้สมการที่ (2-4) ซึ่งไม่เป็นสมการเชิงเส้น (nonlinear) เพื่อคำนวณหาค่า $V_{P_{max}}$ ได้ โดยใช้การคำนวณเชิงตัวเลขด้วยวิธีการของนิวตัน (newton's method)

$$P = IV = n_p I_{ph} V - n_p I_{rs} V \left[\exp\left(\frac{qV}{kTAn_s}\right) - 1 \right] \quad (2-3)$$

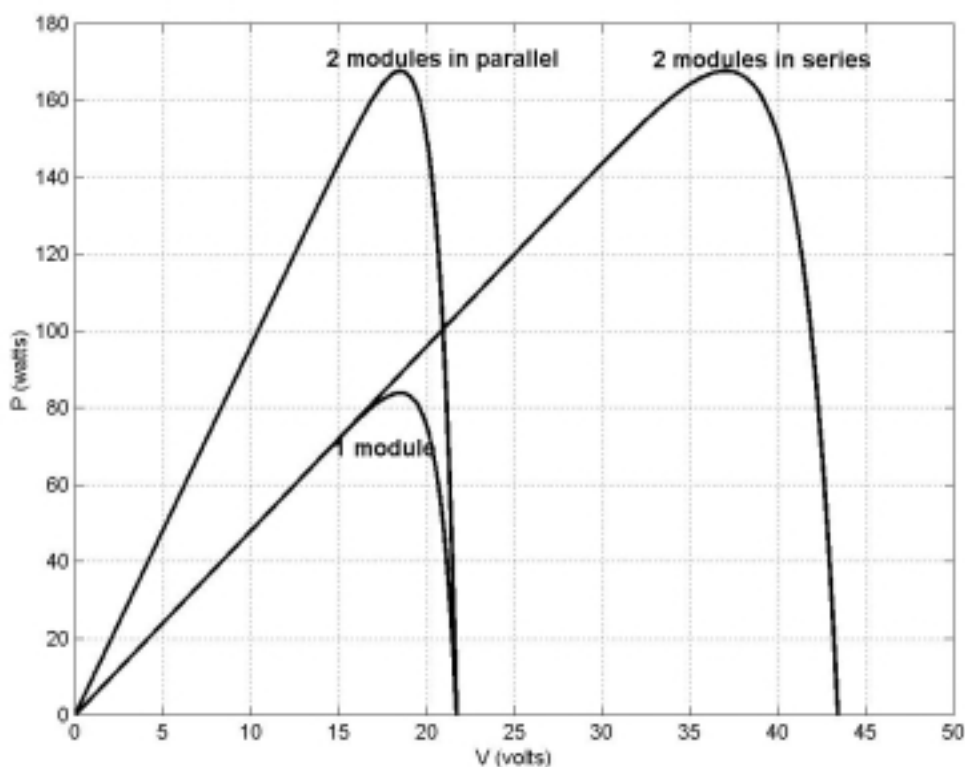
$$\left[\left(\frac{qV_{P_{max}}}{kTAn_s} \right) + 1 \right] \cdot \exp\left(\frac{qV_{P_{max}}}{kTAn_s}\right) = \frac{I_{ph} + I_{rs}}{I_{ph}} \quad (2-4)$$

จากการคำนวณด้วยโปรแกรม ที่ความเข้มแสง 1000 W/m^2 จะได้ค่า $V_{P_{max}} = 18.51 \text{ V}$ จากนั้นนำค่า $V_{P_{max}}$ แทนกลับไปในสมการที่ (2-1) จะได้ค่ากระแสที่ทำให้เกิดกำลังงานสูงสุด ($I_{P_{max}}$) มีค่าเท่ากับ 4.53 A ดังนั้นจึงคำนวณหาค่ากำลังงานสูงสุด (P_{max}) ได้มีค่าเท่ากับ 83.85 W ซึ่งค่าที่ได้จากการคำนวณ ต่างก็สอดคล้องกับรูปกราฟในภาพที่ 2.3, 2.4 และ 2.5 ที่ผ่านมา

2.2.4 การนำมอดูลมาต่อกัน

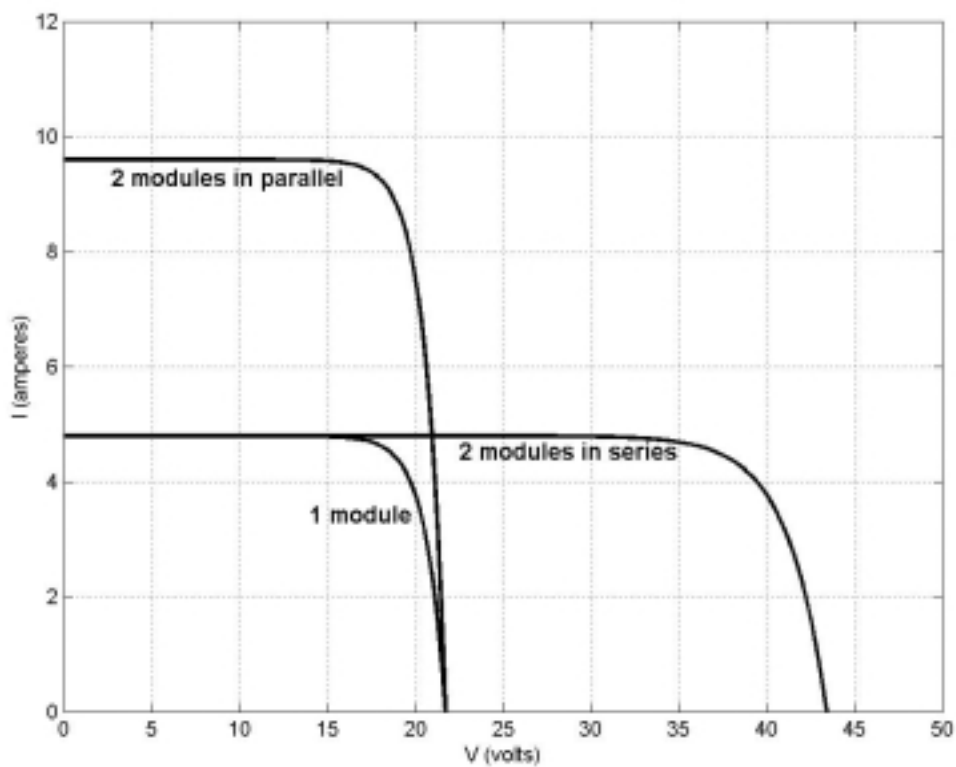
จากผลของค่าแรงดัน กระแสและกำลังงานสูงสุดที่แผงพีวีผลิตได้ในข้างต้น จะสังเกตเห็นว่า แผงพีวีเพียงแค่มอดูลเดียว ไม่มีความเพียงพอต่อการใช้งานในระบบพลังงานผสมผสานซึ่งต้องใช้งานต่อเนื่องตลอดทั้ง 24 ชั่วโมงอย่างอิสระ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องเพิ่มจำนวนมอดูลของแผงพีวีให้มีค่ามากขึ้น ในกรณีที่ต้องการแรงดันเอาต์พุตเพิ่มขึ้นจะต้องนำมอดูลมาต่อกัน และถ้าต้องการกระแสเอาต์พุตเพิ่มขึ้นจะต้องนำมอดูลมาต่อขนานกัน ซึ่งจะยกตัวอย่างให้เห็นโดยพิจารณาที่ความเข้มแสงเท่ากับ $1,000 \text{ W/m}^2$ โดยแยกการพิจารณาออกเป็น แผงพีวีจำนวน 1 มอดูล ซึ่งจะมีค่า n_p และ n_s เท่ากับ 1 และ 36 ตามลำดับ, แผงพีวีอนุกรม 2 มอดูล จะมีค่า n_p และ n_s ที่สอดคล้องเท่ากับ 1 และ 72 ตามลำดับ และแผงพีวีขนาน 2 มอดูล จะมีค่า n_p และ n_s ที่สอดคล้องเท่ากับ 2 และ

36 ตามลำดับ ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกำลังไฟฟ้า แรงดันกับกระแสไฟฟ้า และกระแสกับกำลังไฟฟ้าของแผงโซลาร์เซลล์เมื่อนำมาต่อรวมกัน ได้ดังภาพที่ 2.9, 2.10 และ 2.11 ตามลำดับดังนี้

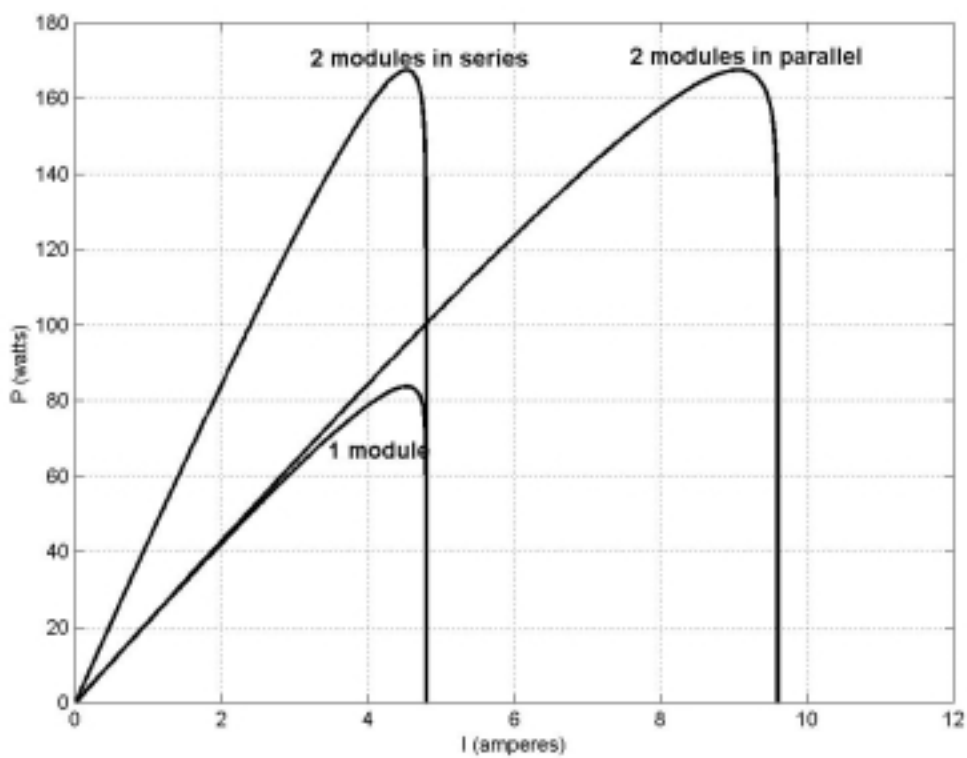


ภาพที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกำลังไฟฟ้าเมื่อนำมาต่อรวมกัน

จากภาพที่ 2.9, 2.10 และ 2.11 จะสังเกตเห็นว่า แรงดันเอาต์พุตที่ทำให้เกิดกำลังงานสูงสุด จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อนำมาต่ออนุกรมกัน และกระแสเอาต์พุตที่ทำให้เกิดกำลังงานสูงสุดจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อนำมาต่อขนานกัน



ภาพที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแสไฟฟ้าเมื่อนำมอดูลต่อร่วมกัน



ภาพที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับกำลังไฟฟ้าเมื่อนำมอดูลต่อร่วมกัน

2.3 แบบจำลองตัวควบคุมตามรอยกำลังงานสูงสุด

การใช้งานแผงฟิโวลอยอย่างคุ้มค่า จะต้องอาศัยกลไกการตามรอยกำลังงานสูงสุด (Maximum Power Point Tracker: MPPT) โดยหลักการแล้วอุปกรณ์ MPPT จะมีหน้าที่สำหรับจัดการให้กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของแผงฟิโวลอยอยู่ที่ระดับสูงสุดสอดคล้องกับความเข้มแสงอาทิตย์ในขณะนั้นๆ อยู่เสมอ ในทางปฏิบัติตัวควบคุม MPPT จะทำงานควบคู่ไปกับ ดีซี/ดีซี คอนเวอร์เตอร์ ซึ่งอาจจะเป็น บั๊ก/บูสต์ ก็ได้ โดยจะทำงานด้วยอัตราส่วนการแปลง D (transformation ratio) ที่เหมาะสมกับสภาวะการทำงานของแหล่งพลังงานและโหลด ในกรณีที่ไม่นับค่ากำลังงานสูญเสียของ ดีซี/ดีซี คอนเวอร์เตอร์ เราสามารถหาค่า D ได้ดังสมการที่ (2-5)

$$D = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{I_{in}}{I_{out}} \quad (2-5)$$

- ซึ่ง V_{in} คือ แรงดันทางด้านอินพุตของ ดีซี/ดีซี คอนเวอร์เตอร์
 V_{out} คือ แรงดันทางด้านเอาต์พุตของ ดีซี/ดีซี คอนเวอร์เตอร์
 I_{in} คือ กระแสทางด้านอินพุตของ ดีซี/ดีซี คอนเวอร์เตอร์
 I_{out} คือ กระแสทางด้านเอาต์พุตของ ดีซี/ดีซี คอนเวอร์เตอร์

2.4 แบบจำลองแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด

2.4.1 ลักษณะสมบัติของแบตเตอรี่ขณะดิสชาร์จ

แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดเป็นแหล่งพลังงานสำรองให้แก่แผงฟิโวลอยที่มีราคาถูก หาได้ง่ายในประเทศ และใช้งานได้ดีในประเทศเขตร้อน แต่ก็มีลักษณะสมบัติการทำงานที่ไม่เป็นเชิงเส้นอย่างมากทั้งในขณะชาร์จและดิสชาร์จ สมการที่ (2-6) อธิบายถึงกระบวนการดิสชาร์จ (Rynkiewicz, 1999)

$$V_b = V_0 - (R_{tot} \cdot I) - \left[K1 \cdot \frac{I^n}{C} \right] \cdot t - \left[\frac{K2}{C - I^n \cdot t} \right] \quad (2-6)$$

- ซึ่ง V_b คือ แรงดันที่ขั้วของแบตเตอรี่ขณะดิสชาร์จ (V)
 V_0 คือ แรงดันเริ่มต้นของแบตเตอรี่ (V)

- R_{tot} คือ ความต้านทานภายในรวม (Ω) ซึ่งจะสมมติให้มีค่าคงที่ ไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และสถานะของการชาร์จ (State of Charge: SOC)
- I คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลในแบตเตอรี่ขณะดิสชาร์จ (A)
- C คือ ค่าความจุของแบตเตอรี่ (Ah)
- t คือ เวลาที่ใช้ในการดิสชาร์จแบตเตอรี่ (h)
- n คือ peukert's exponent (ไม่มีหน่วย)
- $K1$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์จาก peukert's equation
- $K2$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ทำให้แรงดันตกกระทันหันเมื่อแบตเตอรี่ดิสชาร์จใกล้หมด

สมการที่ (2-6) จะพิจารณาเฉพาะช่วงสภาวะคงตัว (steady state) เท่านั้น ที่สภาวะชั่วคราว (transient state) จะไม่นำมาพิจารณาเพราะเป็นช่วงระยะเวลาที่สั้นมาก สภาวะชั่วคราวเกิดขึ้นในจังหวะที่แบตเตอรี่เปลี่ยนการทำงานจากสภาวะชาร์จเป็นดิสชาร์จ หรือเปลี่ยนการทำงานจากสภาวะดิสชาร์จเป็นชาร์จด้วยเวลาที่รวดเร็วมากคิดเป็นเพียงมิลลิวินาที ซึ่งผลเหล่านี้จะทำให้อัตราการชาร์จและดิสชาร์จของแบตเตอรี่ไม่คงที่ ในการพิจารณาลักษณะสมบัติของแบตเตอรี่ทั้งสภาวะคงตัวและสภาวะชั่วคราวนั้น สามารถแบ่งวัฏจักรการทำงานของแบตเตอรี่ออกเป็น 5 ช่วง (Salameh, Casacca, and Lynch, 1992) ได้แก่

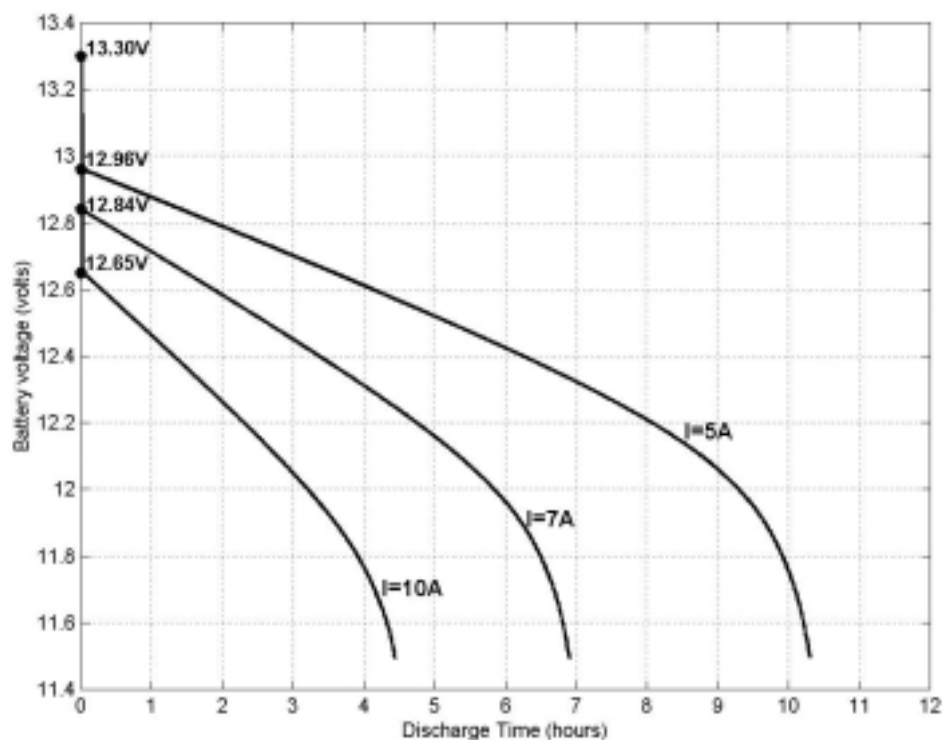
- ช่วงชาร์จด้วยอัตรากระแสคงที่ (constant current charge: CCC)
- ช่วงชาร์จด้วยอัตราแรงดันคงที่ (constant voltage charge: CVC)
- ช่วงดิสชาร์จด้วยอัตรากระแสคงที่ (constant current discharge: CCD)
- ช่วงเวลาในการเปลี่ยนสถานะจากดิสชาร์จเป็นชาร์จ (discharge idle time: DIT)
- ช่วงเวลาในการเปลี่ยนสถานะจากชาร์จเป็นดิสชาร์จ (charge idle time: CIT)

สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ การพิจารณาเฉพาะสภาวะคงตัวก็มีความพอเพียงแล้ว ดังนั้นจึงพิจารณาเฉพาะช่วง CCC, CVC และ CCD เท่านั้น ซึ่งในช่วง CCC และ CCD จะมีค่ากระแสคงที่ ส่วนช่วง CVC จะมีค่าแรงดันคงที่

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแบตเตอรี่ขณะดิสชาร์จ ใช้แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดของ CELTIC (Protogeropoulos, Marshall, and Brinkworth, 1994) ซึ่งมีแรงดันปกติ (nominal) 12 V โดยช่วงแรงดันขณะดิสชาร์จมีค่าแรงดันสูงสุด (SOC 100%) ที่ 13.3 V และแรงดันต่ำสุด (SOC 0%) ที่ 11.5 V และมีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ แสดงได้ดังนี้

- ความจุพิกัด 70 Ah
- R_{tot} ขณะดิสชาร์จ = $6.15 \cdot 10^{-2} \Omega$
- n ขณะดิสชาร์จ = 1.16
- $K1 = 0.90, K2 = 2.2$

นำค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ขณะดิสชาร์จแทนค่าลงในสมการที่ (2-6) จะได้ความสัมพันธ์ของแรงดันแบตเตอรี่ขณะดิสชาร์จ เมื่อพิจารณาอัตราการดิสชาร์จคงที่ที่ 5, 7 และ 10 A ตามลำดับ แสดงได้ดังภาพที่ 2.12



ภาพที่ 2.12 แรงดันแบตเตอรี่ขณะดิสชาร์จ

จากภาพที่ 2.12 จะสังเกตเห็นว่า ขณะเริ่มดิสชาร์จแรงดันที่ขั้วของแบตเตอรี่จะตกลงอย่างรวดเร็วจากแรงดันสูงสุด ซึ่งมีสาเหตุจากค่าความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ จากนั้นแรงดันจะตกลงอย่างราบเรียบแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล ซึ่งเกิดจากค่าความจุของแบตเตอรี่และค่าความต้านทานภายใน และเมื่ออัตราการดิสชาร์จมีค่าสูงขึ้น จะทำให้เวลาในการดิสชาร์จนั้นสั้นลง

2.4.2 ลักษณะสมบัติของแบตเตอรี่ขณะชาร์จ

สมการแรงดันของแบตเตอรี่ขณะชาร์จ มีรูปแบบสมการคล้ายกับแบตเตอรี่ขณะดิสชาร์จ เพียงแค่เปลี่ยนเครื่องหมายของกระแสและค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆ เท่านั้น (Protogeropoulos et al., 1994) ซึ่งสามารถแสดงสมการแรงดันของแบตเตอรี่ขณะชาร์จได้ ดังสมการที่ (2-7)

$$V_b = V_0 + (R_{tot} \cdot I) + \left[K1 \cdot \frac{I^n}{C} \right] \cdot t + \left[\frac{K2}{C - I^n \cdot t} \right] \quad (2-7)$$

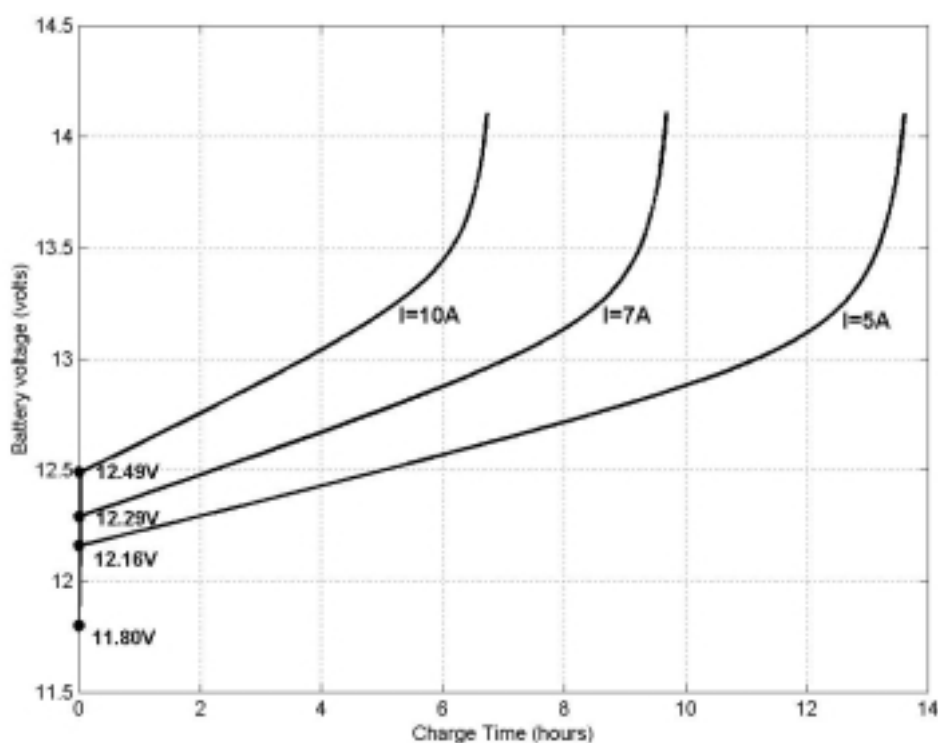
ซึ่ง	V_b	คือ	แรงดันที่ขั้วของแบตเตอรี่ขณะชาร์จ (V)
	V_0	คือ	แรงดันเริ่มต้นของแบตเตอรี่ (V)
	R_{tot}	คือ	ความต้านทานภายในรวม (Ω)
	I	คือ	กระแสไฟฟ้าที่ไหลในแบตเตอรี่ขณะชาร์จ (A)
	C	คือ	ค่าความจุของแบตเตอรี่ (Ah)
	t	คือ	เวลาที่ใช้ในการชาร์จแบตเตอรี่ (h)
	n	คือ	peukert's exponent (ไม่มีหน่วย)
	$K1$	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์จาก peukert's equation
	$K2$	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์ที่ทำให้แรงดันเพิ่มขึ้นกระทันหันเมื่อแบตเตอรี่ดิสชาร์จใกล้เต็ม

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแบตเตอรี่ขณะชาร์จ ยังคงเป็นค่าเดิมเหมือนกับตอนดิสชาร์จ เพียงแค่เปลี่ยนค่า R_{tot} ขณะชาร์จเป็น $6.56 \cdot 10^{-2} \Omega$ และค่า n เป็น 1 ส่วนค่าช่วงแรงดันขณะชาร์จมีค่าแรงดันต่ำสุด (SOC 0%) ที่ 11.8 V และแรงดันสูงสุด (SOC 100%) ที่ 14.1 V

จากค่าพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ในข้างต้น จะสังเกตเห็นว่าช่วงแรงดันที่สภาวะการชาร์จและดิสชาร์จจะไม่ต่อเนื่องกัน (สภาวะการดิสชาร์จมีแรงดันสูงสุดที่ 13.3 V และแรงดันต่ำสุดที่ 11.5 V) โดยแรงดันต่ำสุดที่สภาวะการชาร์จจะมีค่าสูงกว่าแรงดันต่ำสุดที่สภาวะการดิสชาร์จ ทั้งนี้เป็นเพราะในช่วงเวลาอันรวดเร็วที่แบตเตอรี่เปลี่ยนสภาวะจากการดิสชาร์จมาเป็นการชาร์จนั้น แรงดันจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วจาก 11.5 V เป็น 11.8 V ซึ่งที่สภาวะชั่วคราวนี้เราเรียกว่าช่วง DIT ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในตอนต้น ในทำนองเดียวกันแรงดันสูงสุดที่สภาวะการชาร์จจะมีค่าสูงกว่าแรงดันสูงสุดที่สภาวะการดิสชาร์จ ทั้งนี้ก็เป็นเพราะในช่วงเวลาอันรวดเร็วที่แบตเตอรี่เปลี่ยนสภาวะจากการชาร์จมาเป็นการดิสชาร์จนั้น แรงดันจะลดลงอย่างรวดเร็วจาก 14.1 V เป็น 13.3 V ซึ่ง

ที่สภาวะชั่วครู่นี้เราเรียกว่าช่วง CIT และช่วง DIT และ CIT เป็นช่วงระยะเวลาที่รวดเร็วมาก จึงสมมติให้มีค่าเป็นศูนย์ (Protogeropoulos et al., 1994)

นำค่าพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ขณะชาร์จแทนค่าลงในสมการที่ (2-7) จะได้ความสัมพันธ์ของแรงดันแบตเตอรี่ขณะชาร์จ เมื่อพิจารณาอัตราการชาร์จคงที่ที่ 5, 7 และ 10 A ตามลำดับ แสดงได้ดังภาพที่ 2.13

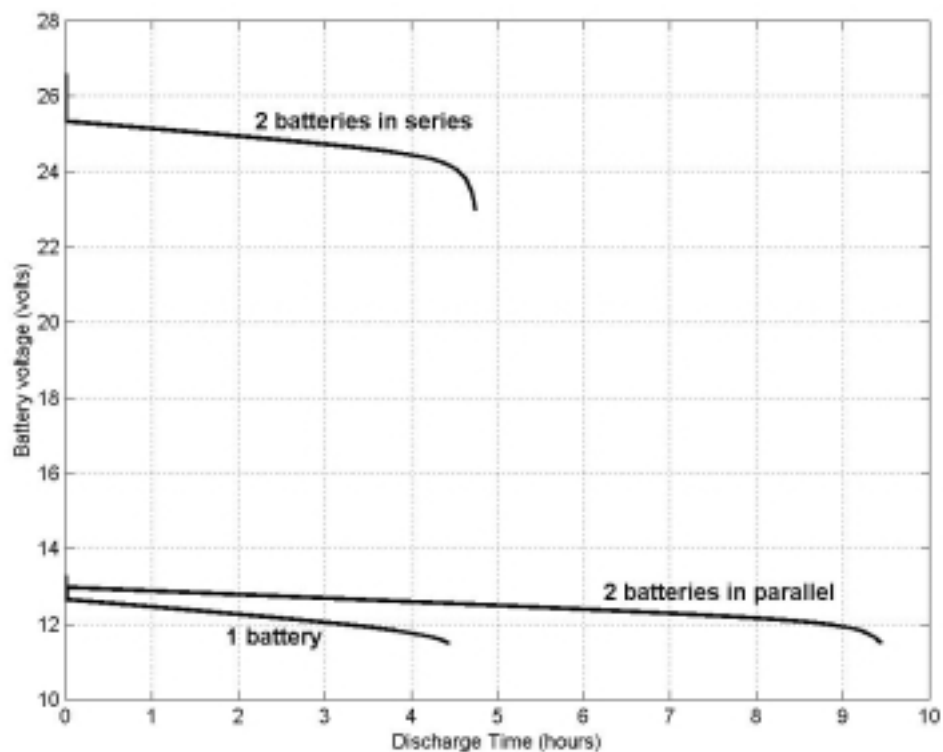


ภาพที่ 2.13 แรงดันแบตเตอรี่ขณะชาร์จ

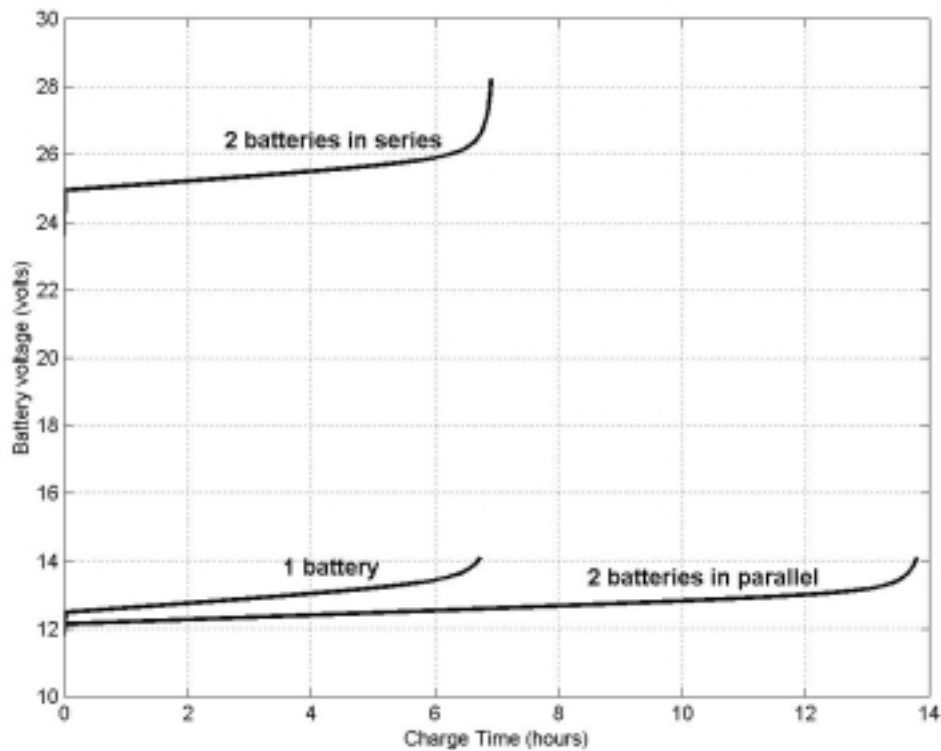
จากภาพที่ 2.13 จะสังเกตเห็นว่า ขณะเริ่มชาร์จแรงดันที่ขั้วของแบตเตอรี่จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจากแรงดันต่ำสุด ซึ่งมีสาเหตุจากค่าความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ จากนั้นแรงดันจะเพิ่มอย่างราบเรียบแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล ซึ่งเกิดจากค่าความจุของแบตเตอรี่และค่าความต้านทานภายใน และเมื่ออัตราการชาร์จมีค่าสูงขึ้น จะทำให้เวลาในการชาร์จนั้นสั้นลง

2.4.3 การนำแบตเตอรี่มาต่อร่วมกัน

จากผลของค่าแรงดันที่ขั้วและค่าความจุของแบตเตอรี่ จะสังเกตเห็นว่า แบตเตอรี่เพียงแค่ลูกเดียว ไม่มีความเพียงพอต่อการใช้งานในระบบพลังงานผสมผสานซึ่งต้องใช้งานต่อเนื่องตลอดทั้ง 24 ชั่วโมงอย่างอิสระ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องเพิ่มจำนวนลูกของแบตเตอรี่ให้มากขึ้น ในกรณีที่ต้องการแรงดันที่ขั้วของแบตเตอรี่เพิ่มขึ้น จะต้องนำแบตเตอรี่มาต่ออนุกรมกัน และถ้าต้องการความจุของแบตเตอรี่เพิ่มขึ้น จะต้องนำแบตเตอรี่มาต่อขนานกัน ซึ่งจะยกตัวอย่างให้เห็นโดยพิจารณาที่อัตราการคายประจุและการชาร์จคงที่ที่ 10 A โดยแยกการพิจารณาออกเป็น แบตเตอรี่ 1 ลูก, แบตเตอรี่อนุกรม 2 ลูก (แรงดันปกติ = 2·12 V, ค่าช่วงแรงดันขณะคายประจุมีค่าแรงดันสูงสุด = 2·13.3 V แรงดันต่ำสุด = 2·11.5 V, ค่าช่วงแรงดันขณะชาร์จมีค่าแรงดันต่ำสุด = 2·11.8 V แรงดันสูงสุด = 2·14.1 V และ R_{tot} ขณะคายประจุและชาร์จมีค่าเท่ากับ $2 \cdot 6.15 \cdot 10^{-2} \Omega$ และ $2 \cdot 6.56 \cdot 10^{-2} \Omega$ ตามลำดับ) และแบตเตอรี่ขนาน 2 ลูก ($C = 2 \cdot 70$ Ah และ R_{tot} ขณะคายประจุและชาร์จมีค่าเท่ากับ $(6.15/2) \cdot 10^{-2} \Omega$ และ $(6.56/2) \cdot 10^{-2} \Omega$ ตามลำดับ) ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ของแรงดันที่ขั้วของแบตเตอรี่ขณะคายประจุและขณะชาร์จ เมื่อนำแบตเตอรี่มาต่อร่วมกัน ดังแสดงด้วยภาพที่ 2.14 และ 2.15 ตามลำดับ



ภาพที่ 2.14 แรงดันแบตเตอรี่ขณะคายประจุเมื่อนำแบตเตอรี่ต่อร่วมกัน

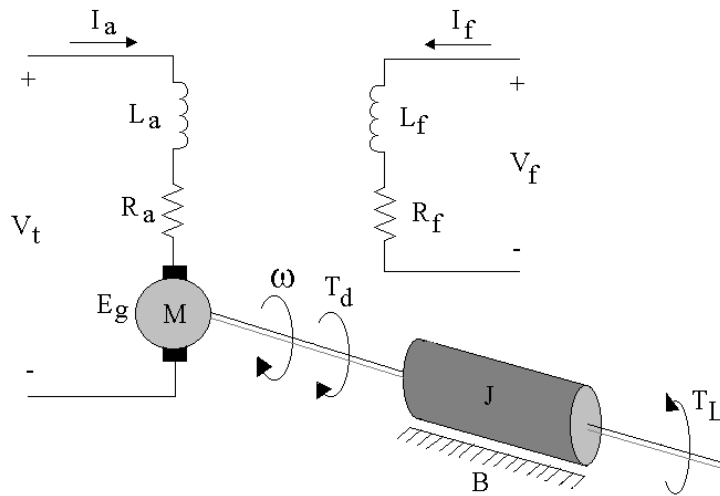


ภาพที่ 2.15 แรงดันแบตเตอรี่ขณะชาร์จเมื่อนำแบตเตอรี่ต่อร่วมกัน

จากภาพที่ 2.14 และ 2.15 จะสังเกตเห็นว่า แรงดันที่ขั้วของแบตเตอรี่ขณะชาร์จและชาร์จ จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อนำแบตเตอรี่มาต่ออนุกรมกัน และความจุของแบตเตอรี่จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อนำแบตเตอรี่มาต่อขนานกัน โดยจะสังเกตได้จากเวลาที่ใช้ในการชาร์จหมด และเวลาที่ใช้ในการชาร์จเต็ม จะมีค่าเวลาที่เพิ่มมากขึ้นตามค่าความจุที่สูงขึ้น

2.5 แบบจำลองมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นฟลักซ์แยกส่วน

การหาแบบจำลองมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ เป็นแบบกระตุ้นฟลักซ์แยกส่วน โดยมีวงจรสมมูลแสดงได้ดังภาพที่ 2.16 (Ramamurthi and Subrahmanyam, 1991) เมื่อใช้งานมอเตอร์ด้วยการปรับแรงดันอาร์เมเจอร์โดยมีความเข้มสนามเต็มพิกัด



ภาพที่ 2.16 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

เมื่อ	V_t, V_f	คือ แรงดันที่ป้อนให้มอเตอร์ทางด้านอาร์เมเจอร์และฟิลด์ตามลำดับ (V)
	I_a, I_f	คือ กระแสอาร์เมเจอร์และฟิลด์ตามลำดับ (A)
	L_a, L_f	คือ ความเหนี่ยวนำทางด้านอาร์เมเจอร์และฟิลด์ตามลำดับ (H)
	R_a, R_f	คือ ความต้านทานอาร์เมเจอร์และฟิลด์ตามลำดับ (Ω)
	ω	คือ ความเร็วเชิงมุม (rad/sec)
	J	คือ โมเมนต์แรงเฉื่อยของมอเตอร์ (Kg.m^2)
	B	คือ วิสคอสฟริกชันของมอเตอร์ (N.m/rad/sec)
	E_g	คือ แรงดันย้อนกลับของมอเตอร์: $k_b\omega$ (V)
	T_d	คือ แรงบิดที่มอเตอร์สร้างขึ้น: $k_t I_a$ (N.m)
	T_L	คือ แรงบิดของโหลด (N.m)

จากภาพที่ 2.16 สามารถอธิบายความสัมพันธ์ของแรงดันทางด้านอาร์เมเจอร์ ได้ดังสมการ

$$V_t = R_a I_a + L_a \frac{dI_a}{dt} + E_g$$

$$V_t = R_a I_a + L_a \frac{dI_a}{dt} + k_b \omega \quad (2-8)$$

และสามารถอธิบายความสัมพันธ์ของแรงบิด ได้ดังสมการ

$$T_d = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega + T_L$$

$$k_t I_a = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega + T_L \quad (2-9)$$

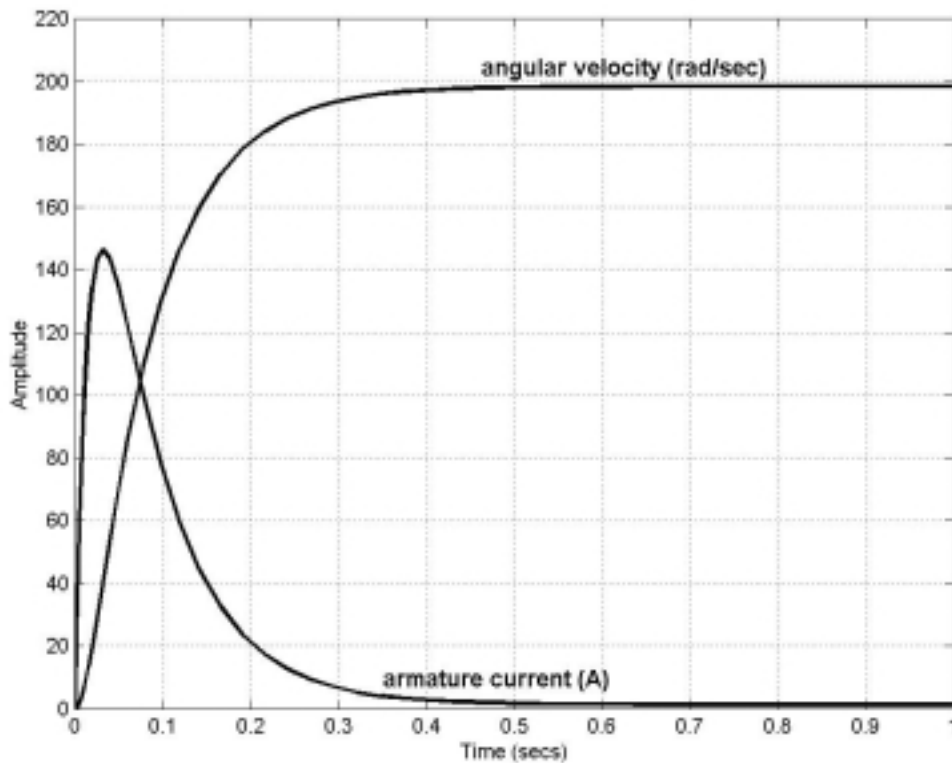
นำสมการที่ (2-8) และ (2-9) มาจัดรูปสมการใหม่ แล้วเขียนให้อยู่ในรูปสมการสถานะ (state equation) จึงได้แบบจำลองของมอเตอร์ ดังสมการที่ (2-10)

$$\begin{bmatrix} \frac{dI_a}{dt} \\ \frac{d\omega}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_a}{L_a} & -\frac{k_b}{L_a} \\ \frac{k_t}{J} & -\frac{B}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_a} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_t \\ T_L \end{bmatrix} \quad (2-10)$$

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของมอเตอร์ (Sousa and Bose, 1994) แสดงได้ดังนี้

- ขนาดพิกัด 110 V, 20 A, 2.5 hp, 1800 rpm, 9.89 N-m
- $R_a = 0.6 \Omega$
- $L_a = 8 \text{ mH}$
- $J = 0.0465 \text{ kg-m}^2$
- $B = 0.004 \text{ N-m.sec/rad}$
- $k_t (\text{N-m/A}) = k_b (\text{V/rad/sec}) = 0.55 \text{ N-m/A}$

จากสมการที่ (2-10) และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของมอเตอร์ จึงได้ความสัมพันธ์ของ I_a และ ω โดยการใช้งานโปรแกรม เมื่อป้อนแรงดันที่ค่าพิกัด $V_t = 110 \text{ V}$ และมอเตอร์ทำงานที่สภาวะไร้อโหลด $T_L = 0$ เมื่อกำหนดให้ที่เวลาเป็นศูนย์ I_a และ ω มีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งแสดงได้ดังภาพที่ 2.17



ภาพที่ 2.17 ค่ากระแสอาร์เมเจอร์และความเร็วของมอเตอร์ขณะไร้โหลด

จากภาพที่ 2.17 จะสังเกตเห็นว่า I_a และ ω เข้าสู่สภาวะคงตัวที่ 1.44 A และ 198.43 rad/sec ตามลำดับ โดยค่าที่ได้ จะสอดคล้องกับสมการที่ (2-8) และ (2-9) เมื่อพิจารณาที่สภาวะคงตัว

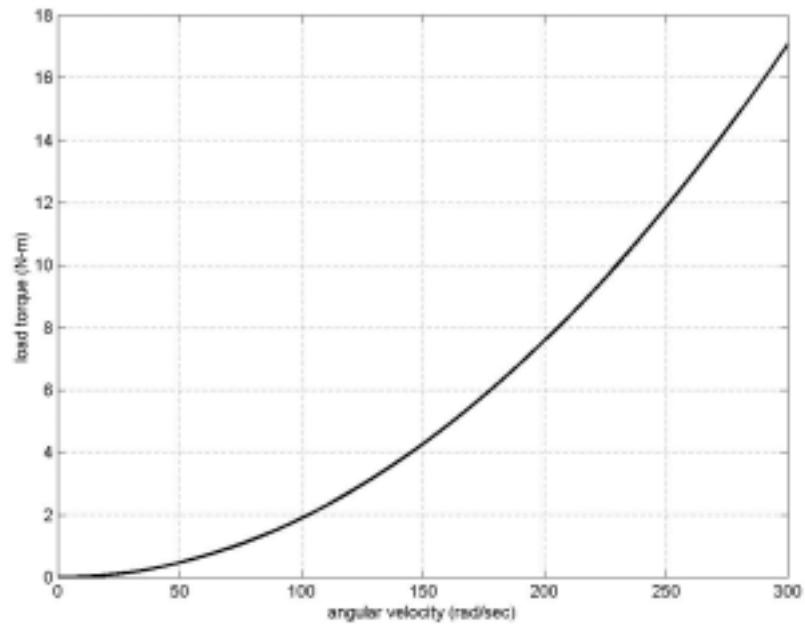
2.6 แบบจำลองปั๊มหอยโข่ง

2.6.1 แรงบิดของปั๊มหอยโข่ง

ปั๊มหอยโข่ง เป็นเครื่องสูบบางแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่ใช้กำลังเหวี่ยงออกจากศูนย์กลาง ดันน้ำขึ้นไป มีราคาถูก ประสิทธิภาพสูง และง่ายในการติดตั้ง โดยมีแรงบิดขึ้นอยู่กับความเร็ว ดังแสดงได้ด้วยสมการที่ (2-11)

$$T_L = k\omega^2 \quad (2-11)$$

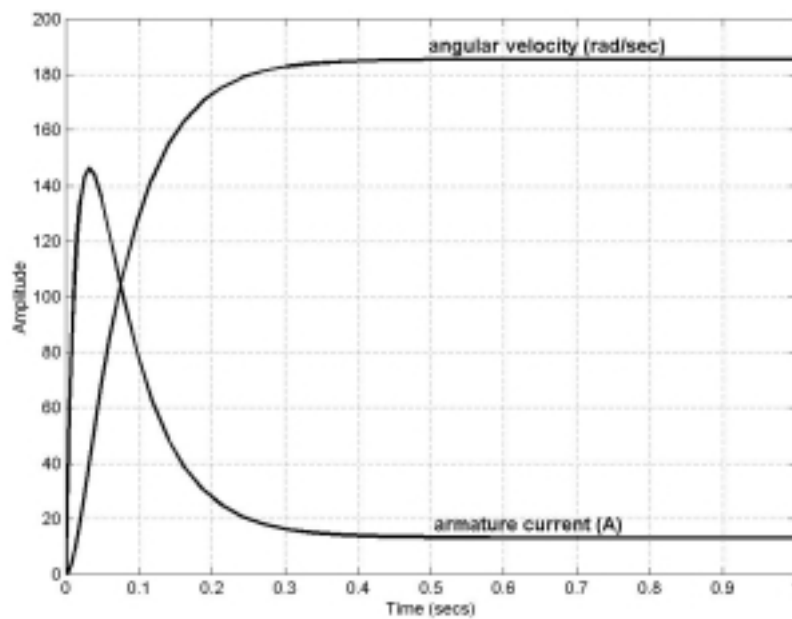
เมื่อ k คือค่าคงที่ของปั๊ม มีค่าเท่ากับ $1.898 \cdot 10^{-4} \text{ N-m/(rad/sec)}^2$ (Yao and Ramshaw, 1995) ดังนั้นจึงได้ความสัมพันธ์ของแรงบิดเทียบกับความเร็ว ดังแสดงด้วยภาพที่ 2.18



ภาพที่ 2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วของปั๊ม

2.6.2 ผลของมอเตอร์เมื่อขับปั๊มหอยโข่ง

จากสมการที่ (2-10) และค่าพารามิเตอร์ของปั๊มและมอเตอร์ จึงได้ความสัมพันธ์ของ I_a และ ω โดยการใช้งานโปรแกรม เมื่อป้อนแรงดันที่ค่าพิกัด $V_t = 110$ V เมื่อกำหนดให้ที่เวลาเป็นศูนย์ I_a และ ω มีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งแสดงได้ดังภาพที่ 2.19



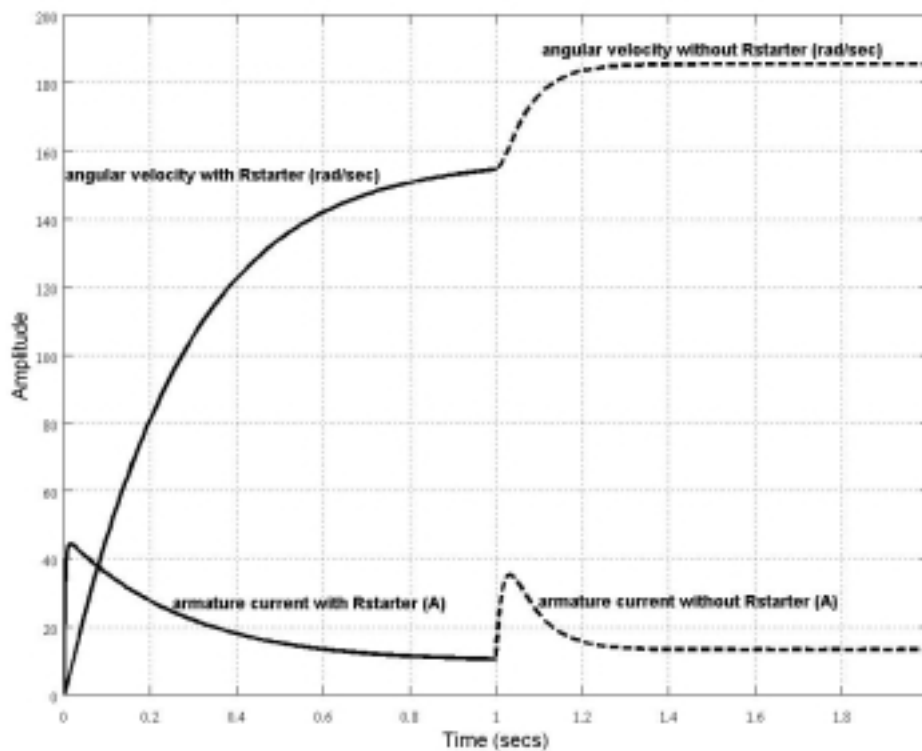
ภาพที่ 2.19 ค่ากระแสอาร์เมเจอร์และความเร็วของมอเตอร์ขณะขับปั๊ม

จากภาพที่ 2.19 จะสังเกตเห็นว่า I_a เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในขณะที่เริ่มเดินเครื่อง โดยมีค่าสูงสุดที่ 146.49 A และลดลงอย่างรวดเร็วเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ 13.25 A ส่วน ω เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ 185.56 rad/sec โดยจะสังเกตเห็นว่า ความเร็วขณะที่มีโหลดมีค่าใกล้เคียงกับความเร็วขณะไร้อโหลดที่ผ่านมาในข้างต้น ซึ่งเป็นคุณลักษณะข้อดีของมอเตอร์กระแสตรงแบบกระตุ้นฟิวด์แยกส่วนที่มีโหลดเป็นปั๊มหอยโข่ง ที่ความเร็วไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อโหลดเปลี่ยนแปลงไป

2.6.3 การลดค่ากระแสอาร์เมเจอร์ขณะเริ่มเดินเครื่อง

จากภาพที่ 2.19 จะเห็นได้ว่า กระแสอาร์เมเจอร์เมื่อเริ่มเดินเครื่องจะมีค่าสูงกว่ากระแสที่ค่าพิกัดของมอเตอร์ประมาณ 7 เท่า ทั้งนี้เป็นผลมาจาก ตอนเริ่มเดินเครื่องจะคงยังไม่มีแรงดันย้อนกลับของมอเตอร์ ปริมาณกระแสค่าสูงๆ นี้ จะมีผลต่อความสามารถของแหล่งจ่ายที่จ่ายให้แก่มอเตอร์ ดังนั้นเพื่อยืดอายุการใช้งานของแหล่งจ่าย และช่วยลดการสึกหรอและกำลังงานสูญเสียในขณะเริ่มเดินเครื่อง จึงมีความจำเป็นต้องลดค่ากระแสขณะเริ่มเดินเครื่องให้มีความลดลง ซึ่งในที่นี่ จะเลือกใช้วิธีการนำตัวต้านทานจากภายนอกมาต่อร่วม ซึ่งเป็นวิธีที่ราคาถูกและดูแลรักษาง่าย อีกทั้งมอเตอร์ก็ทำงานตลอดทั้ง 24 ชั่วโมง โอกาสในการเริ่มเดินเครื่องใหม่น้อย จึงไม่มีความจำเป็นต้องเลือกใช้วิธีการที่มีความละเอียดและแม่นยำมากนัก โดยวิธีนี้ จะนำความต้านทานขณะเริ่มเดินเครื่อง (R_{starter}) มาต่ออนุกรมเข้ากับมอเตอร์เพื่อช่วยจำกัดกระแสขณะเริ่มเดินเครื่อง ซึ่งจะต้องเลือกค่าความต้านทานที่พอเหมาะโดยคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงของกระแสอาร์เมเจอร์และอัตราเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงไปประกอบการพิจารณาด้วย

จากการใช้งานโปรแกรมเพื่อคัดเลือกค่า R_{starter} ที่พอเหมาะ จะได้ค่า R_{starter} ที่เหมาะสมมีค่าประมาณ 3 เท่าของความต้านทานในตัวมอเตอร์ ($R_{\text{starter}} = 3R_a$, โดยที่ $R_a = 0.6 \Omega$) ดังนั้นขณะเริ่มเดินเครื่องจึงมีค่าความต้านทานรวมทั้งหมด $0.6 + 1.8 = 2.4 \Omega$ เพื่อลดค่ากำลังงานสูญเสียที่นำ R_{starter} มาต่ออนุกรม เมื่อเดินเครื่องไปแล้วประมาณ 1 วินาที ก็ควรนำ R_{starter} ออก ให้เหลือแต่ความต้านทานในตัวมอเตอร์อย่างเดียวนั่น ซึ่งแสดงผลการมี R_{starter} มาต่อร่วมได้ดังภาพที่ 2.20



ภาพที่ 2.20 คุณลักษณะของกระแสและความเร็วของมอเตอร์เมื่อมี R_{starter} ต่อร่วม

จากภาพที่ 2.20 จะสังเกตเห็นว่า เมื่อนำ R_{starter} มาต่อร่วม I_a ขณะเริ่มเดินเครื่องมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยมีค่าสูงสุดเพียง 44.30 A เท่านั้น และก่อนปลด R_{starter} ออก I_a มีค่าเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ 10.43 A เมื่อปลด R_{starter} ออกหลังจากเดินเครื่องไปแล้ว 1 วินาที I_a จะเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วอีกครั้ง โดยมีค่าสูงสุด 35.20 A และเข้าสู่สภาวะคงตัว 13.25 A เท่าเดิมกับในสภาวะที่ไม่มี R_{starter} มาต่อร่วมเหมือนกับที่เคยผ่านมา

ส่วน ω ขณะเริ่มเดินเครื่องก็มีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยก่อนปลด R_{starter} ออก ω มีค่าเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ 154.53 rad/sec เมื่อปลด R_{starter} ออกหลังจากเดินเครื่องไปแล้ว 1 วินาที ω จะเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วอีกครั้งและเข้าสู่สภาวะคงตัว 185.56 rad/sec เท่าเดิมกับในสภาวะที่ไม่มี R_{starter} มาต่อร่วมเหมือนกับที่เคยผ่านมา

2.6.4 ลักษณะสมบัติแรงดัน-กระแสของมอเตอร์เมื่อขับโหลด

ความสัมพันธ์ของแรงดันทางด้านอาร์เมเจอร์และแรงบิดของมอเตอร์ สามารถอธิบายได้จากสมการที่ (2-8) และ (2-9) ตามลำดับ ดังนั้นที่สภาวะคงตัวจึงได้ความสัมพันธ์ของแรงดันและแรงบิดของมอเตอร์ ดังสมการที่ (2-12) และ (2-13) ตามลำดับ

$$V_t = R_a I_a + k_b \omega \quad (2-12)$$

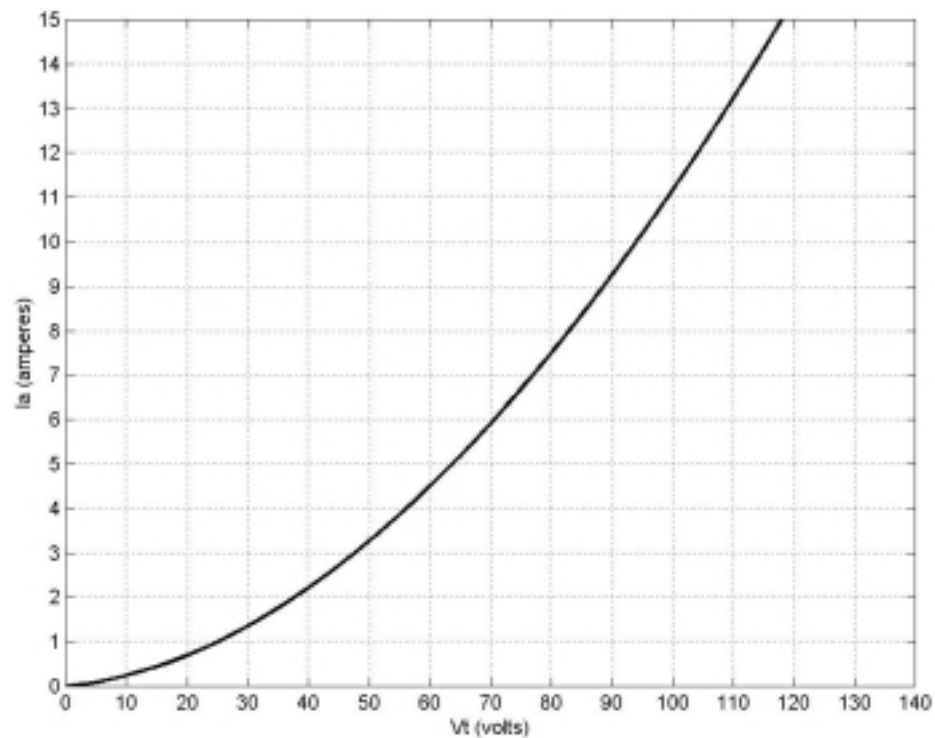
$$k_b I_a = B\omega + T_L \quad (2-13)$$

นำสมการที่ (2-11) ซึ่งเป็นสมการแรงบิดของปั๊ม แทนค่าลงในสมการที่ (2-13) แล้วหาค่า ω โดยที่ ω ต้องมีค่าเป็นบวกเท่านั้น แสดงได้ดังสมการที่ (2-14)

$$\omega = \frac{-B/k + \sqrt{(B/k)^2 + (4k_b I_a/k)}}{2} \quad (2-14)$$

นำสมการที่ (2-14) แทนค่าลงในสมการที่ (2-12) ซึ่งจะได้สมการแสดงลักษณะสมบัติแรงดัน-กระแสของมอเตอร์เมื่อมีปั๊มหอยโข่งต่อพ่วง แสดงได้ดังสมการที่ (2-15) และแสดงลักษณะสมบัติของมอเตอร์ ด้วยการแทนค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์และปั๊มที่ผ่านมาในข้างต้น ดังแสดงด้วยภาพที่ 2.21

$$V_t = R_a I_a + k_b \left[\frac{-B/k + \sqrt{(B/k)^2 + (4k_b I_a/k)}}{2} \right] \quad (2-15)$$



ภาพที่ 2.21 ลักษณะสมบัติแรงดัน-กระแสของมอเตอร์เมื่อขับโหลด

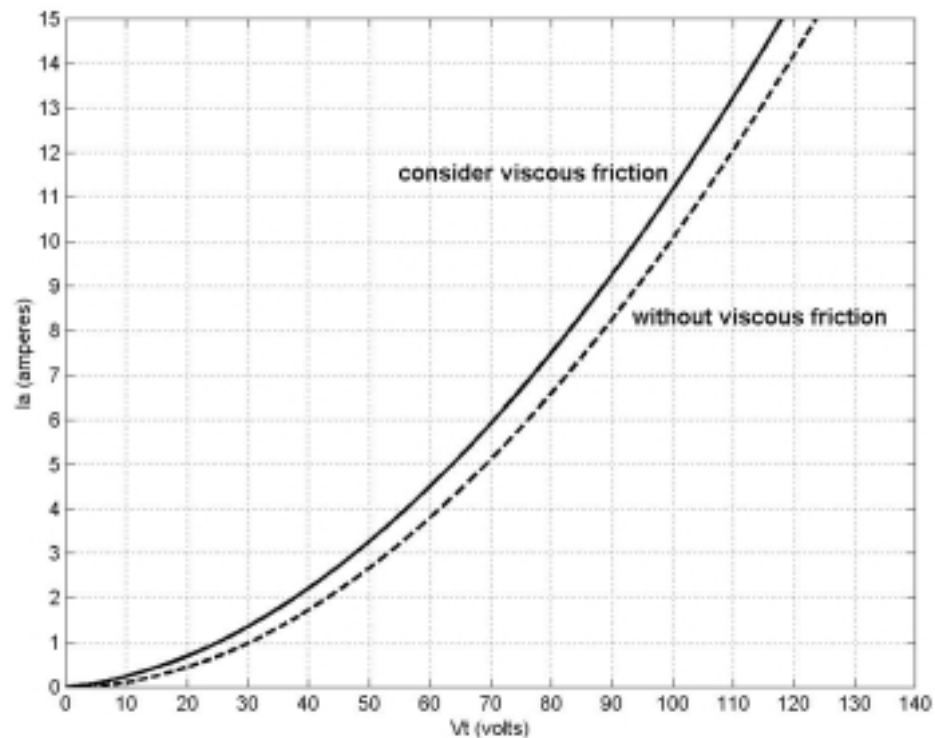
จากภาพที่ 2.21 จะสังเกตเห็นว่า ค่า V_t และ I_a ที่ได้ในสภาวะคงตัว มีค่าเท่ากับ 110 V และ 13.25 A ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ผ่านมา

เพื่อให้การหาลักษณะสมบัติของแรงดัน-กระแสมีความง่ายขึ้น จะพิจารณาว่าทอมแรงฝืดวิสกอสฟริกชัน (viscous friction: $B\omega$) มีค่าน้อยมาก (Saied, 1988) ดังนั้นจากสมการที่ (2-13) จึงได้

$$k_b I_a = T_L \quad (2-16)$$

นำสมการที่ (2-16) และสมการที่ (2-11) แทนค่าลงในสมการที่ (2-12) ซึ่งจะได้สมการแสดงลักษณะสมบัติแรงดัน-กระแสของมอเตอร์เมื่อไม่พิจารณาทอมแรงฝืดวิสกอสฟริกชัน ดังสมการที่ (2-17) และแสดงผลเพื่อเปรียบเทียบกับเมื่อพิจารณาทอมแรงฝืดวิสกอสฟริกชัน แสดงได้ดังภาพที่ 2.22

$$V_t = R_a I_a + (k_b^{1.5}) \sqrt{I_a/k} \quad (2-17)$$



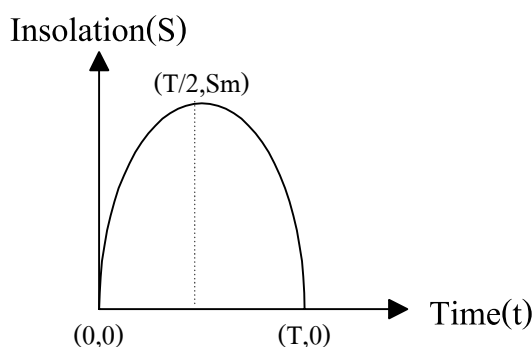
ภาพที่ 2.22 ผลการเปรียบเทียบลักษณะสมบัติแรงดัน-กระแสของมอเตอร์

จากภาพที่ 2.22 จะสังเกตเห็นว่า กรณีที่ไม่พิจารณาเทอมแรงเสียดทานของฟลักซ์กลับ ลักษณะสมบัติแรงดัน-กระแสของมอเตอร์ จะมีค่าแตกต่างกับกรณีที่พิจารณาเทอมแรงเสียดทานของฟลักซ์กลับเพียงเล็กน้อย โดยกรณีที่ไม่พิจารณา จะมีค่าความชันน้อยกว่ากรณีที่พิจารณา เนื่องจากมอเตอร์ไม่มีความจำเป็นต้องจ่ายกระแสอาร์มเจอร์เพื่อเอาชนะแรงเสียดทานของฟลักซ์กลับ

2.7 แบบจำลองความเข้มแสงอาทิตย์

จากการจัดทำแผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีความแม่นยำสูงทั่วประเทศ โดยใช้ข้อมูลดาวเทียม GMS 4 และ GMS 5 ตั้งแต่เดือนมกราคม 2536 ถึงธันวาคม 2541 จำนวน 6 ปี จากข้อมูลดาวเทียมที่ได้ ค่าเฉลี่ยความเข้มแสงอาทิตย์ทั่วประเทศจากทุกพื้นที่จะมีค่าเท่ากับ 18.2 MJ/m²/day หรือเท่ากับ 5.06 kw.hr/m²/day (1 kw.hr = 3.6 MJ) (กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน และ มหาวิทยาลัยศิลปากร, ซีดี-รอม, ม.ป.ป.) เพื่อจ่ายต่อการนำไปใช้งาน จึงประมาณค่าเท่ากับ 5 kw.hr/m²/day

(Harrington, Corporation, and Dunlop, 1992) ได้เสนอค่าความเข้มแสงอาทิตย์ที่มีลักษณะเป็นรูปพาราโบลาระฆังคว่ำ ดังภาพที่ 2.23 ซึ่งเป็นค่าความเข้มแสงอาทิตย์ที่สอดคล้องกับความเป็นจริงในวันที่ฟ้าเปิด (sunny day) มากที่สุด และมีความสอดคล้องกับความเข้มแสงอาทิตย์ในประเทศเขตร้อนอย่างเช่นประเทศไทย และในรอบปีค่าความเข้มแสงอาทิตย์ในประเทศไทยก็มีลักษณะเปลี่ยนแปลงไปจากรูปพาราโบลาระฆังคว่ำไม่มากนัก



ภาพที่ 2.23 ลักษณะของรูปพาราโบลาระฆังคว่ำ

พาราโบลาระฆังคว่ำ มีสมการทั่วไปอยู่ในรูป $(x-h)^2 = -4p(y-k)$ เมื่อ (h,k) คือจุดยอดของพาราโบลา และ p คือระยะที่วัดจากจุดยอดไปตามแนวแกนพาราโบลา ดังนั้นจากภาพที่ 2.23 จึงได้

$$\left(t - \frac{T}{2}\right)^2 = -4p(S - S_m)$$

$$S = S_m - \frac{1}{4p} \left(t - \frac{T}{2}\right)^2 \quad (2-18)$$

แทนค่า (t,S) ที่จุด $(0,0)$ และ $(T,0)$ ลงในสมการที่ (2-18) โดยทั้ง 2 จุด จะได้ผลลัพธ์เหมือนกัน ดังสมการที่ (2-19)

$$S_m p = \frac{T^2}{16} \quad (2-19)$$

ให้ A คือ พื้นที่ใต้กราฟของภาพที่ 2.23 ดังนั้น จากสมการที่ (2-18) จึงได้

$$\begin{aligned}
A &= \int_0^T S dt = \int_0^T S_m dt - \frac{1}{4p} \int_0^T \left(t - \frac{T}{2}\right)^2 \\
&= \left[S_m t \right]_0^T - \left[\left(\frac{1}{4p} \right) \left(\frac{1}{3} \right) \left(t - \frac{T}{2} \right)^3 \right]_0^T \\
&= S_m T - \left(\frac{1}{4p} \right) \left(\frac{1}{3} \right) \left[\left(\frac{T}{2} \right)^3 - \left(-\frac{T}{2} \right)^3 \right] \\
&= S_m T - \frac{T^3}{48p} \tag{2-20}
\end{aligned}$$

แทนสมการที่ (2-19) ลงในสมการที่ (2-20) จะได้ค่า p ดังสมการที่ (2-21) และแทนสมการที่ (2-21) ลงในสมการที่ (2-19) จะได้ค่า S_m ดังสมการที่ (2-22) จากนั้น แทนค่า p และ S_m ที่ได้ลงในสมการที่ (2-18) จะได้ผลลัพธ์ดังสมการที่ (2-23)

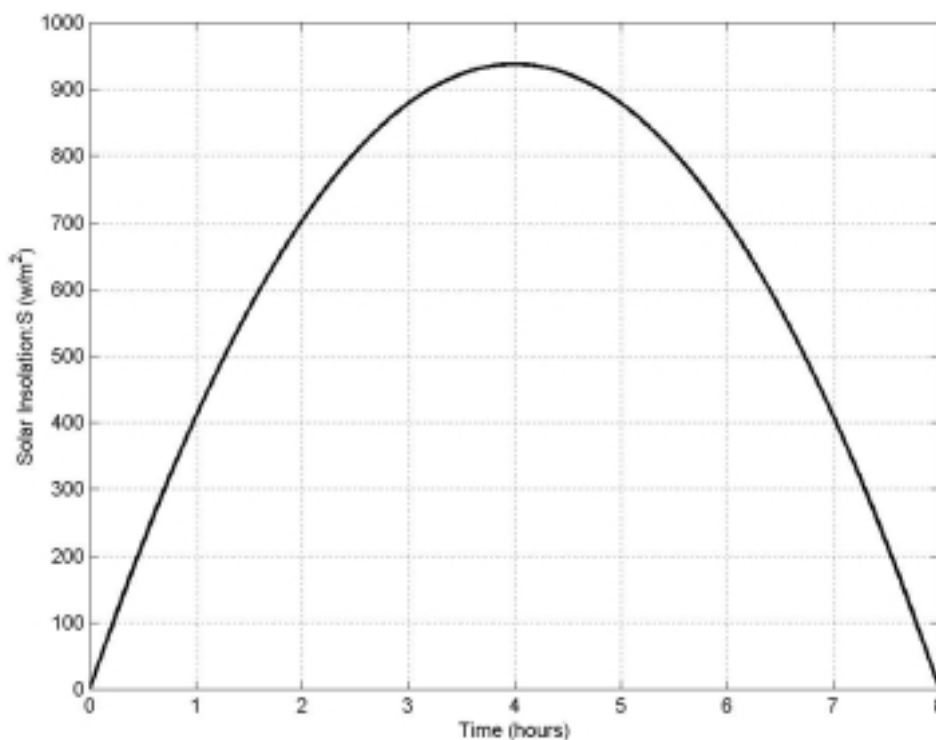
$$p = \frac{T^3}{24A} \tag{2-21}$$

$$S_m = \frac{3}{2} \left(\frac{A}{T} \right) \tag{2-22}$$

$$S = \frac{3}{2} \left(\frac{A}{T} \right) - \frac{6A}{T^3} \left(t - \frac{T}{2} \right)^2 \tag{2-23}$$

โดยพื้นที่ใต้กราฟ A เท่ากับ $5,000 \text{ w.hr/m}^2/\text{day}$ และในหนึ่งวัน จะกำหนดให้มีแสงอาทิตย์ทั้งหมด 8 ชั่วโมง (08.00-16.00 น.) ดังนั้น $T = 8 \text{ hr}$. ซึ่งจากสมการที่ (2-23) จึงได้ค่าความเข้มแสง S ซึ่งสัมพันธ์กับเวลา t ดังสมการที่ (2-24) หรือแสดงความสัมพันธ์ได้ดังภาพที่ 2.24 (หมายเหตุ: เวลาที่ 0 หมายถึง 08.00 น. และเวลาที่ 8 ชั่วโมง หมายถึง 16.00 น.)

$$S = 937.5 - 58.59(t - 4)^2 \tag{2-24}$$



ภาพที่ 2.24 ค่าความเข้มแสงอาทิตย์ในหนึ่งวัน

2.8 สรุป

งานวิจัยวิทยานิพนธ์ในบทที่ 2 นี้ ได้บรรยายถึงรายละเอียดของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุปกรณ์ต่างๆ ที่ต่อกันเข้าเป็นระบบพลังงานผสมผสาน อันประกอบด้วย แผงพีวี แบตเตอรี่ ตัวควบคุมตามรอยกำลังงานสูงสุด มอเตอร์ต่อควบปั้มน้ำ รวมทั้งความเข้มแสงอาทิตย์ ดังแสดงได้ด้วยภาพที่ 2.1 พร้อมระบุค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้โดยตรง โดยจะสังเกตเห็นว่า อุปกรณ์ส่วนใหญ่มีลักษณะการใช้งานไม่ง่ายนัก เพราะมีลักษณะสมบัติทางพลวัตไม่เป็นเชิงเส้นและยากแก่การทำความเข้าใจ โดยสิ่งที่กล่าวมาทั้งหมดในบทนี้ จะได้นำไปใช้เพื่อเป็นแนวทางในการประหยัดพลังงานในระบบ และนำไปสู่การอธิบายถึงการออกแบบจำนวนของแผงพีวีและแบตเตอรี่ที่พอเหมาะ รวมทั้งมีการพัฒนาขึ้นเป็น โปรแกรมจำลองสถานการณ์ในระบบ ดังที่จะได้กล่าวถึงในบทต่อไป

บทที่ 3

การถ่ายโอนพลังงานในระบบอย่างเหมาะสมที่สุด

3.1 บทนำ

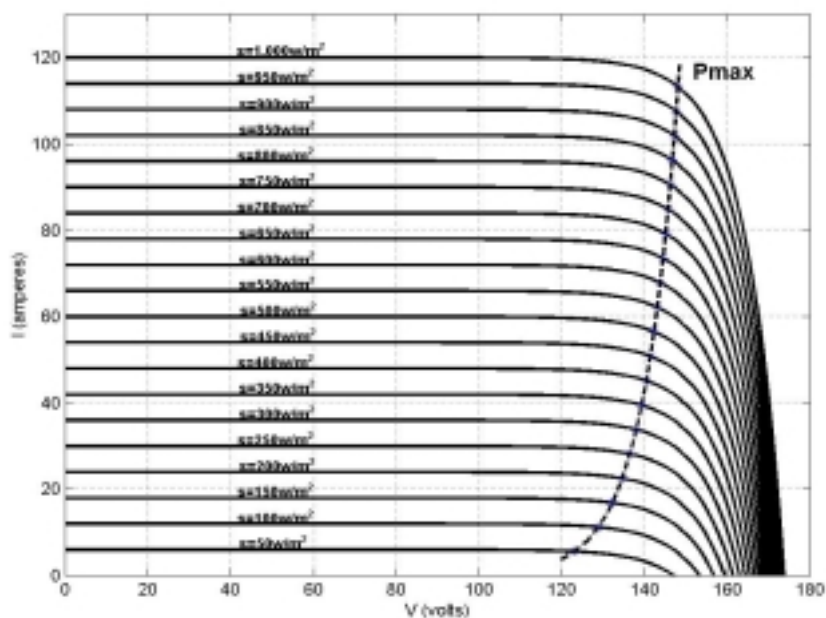
การถ่ายโอนพลังงานในระบบพลังงานผสมผสานอย่างเหมาะสมที่สุด นับเป็นหัวข้อหลักในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ที่มีความสำคัญและมีบทบาทอย่างยิ่งทางด้านการอนุรักษ์พลังงาน การดำเนินงานจะต้องคำนึงถึงลักษณะสมบัติที่ไม่เป็นเชิงเส้นอย่างมากของอุปกรณ์ในระบบ ทั้งแผงฟิวดิโวลต์เซลล์ และมอเตอร์ต่อควบปั้มน้ำ ในบทนี้จึงได้นำเสนอผลงานวิจัยด้านการถ่ายโอนพลังงานอย่างเหมาะสมที่สุด โดยจะแบ่งการพิจารณาออกเป็นการหาค่ากำลังงานสูงสุดที่ความเข้มแสงค่าต่างๆ การวิเคราะห์อัตราส่วนการแปลงพลังงานของ ดีซี/ดีซี คอนเวอร์เตอร์ เพื่อให้เกิดการถ่ายโอนกำลังงานได้สูงที่สุด ซึ่งจะพิจารณาถึงการถ่ายโอนของพลังงานแบบใช้พลังงานโดยตรง (direct-coupling) ระหว่างแผงฟิวดิโวลต์เซลล์กับมอเตอร์และแผงฟิวดิโวลต์เซลล์กับแบตเตอรี่ และแบบใช้พลังงานผสมผสาน (hybrid) ระหว่างแผงฟิวดิโวลต์เซลล์กับมอเตอร์และแบตเตอรี่ รวมทั้งทำการวิเคราะห์หาอัตรากระแสขับเคลื่อนมอเตอร์ในสภาวะที่ทำให้เกิดการสูญเสียในมอเตอร์ต่ำที่สุด

3.2 การหาค่ากำลังงานสูงสุดตลอดทั้งวันที่มีแสงอาทิตย์

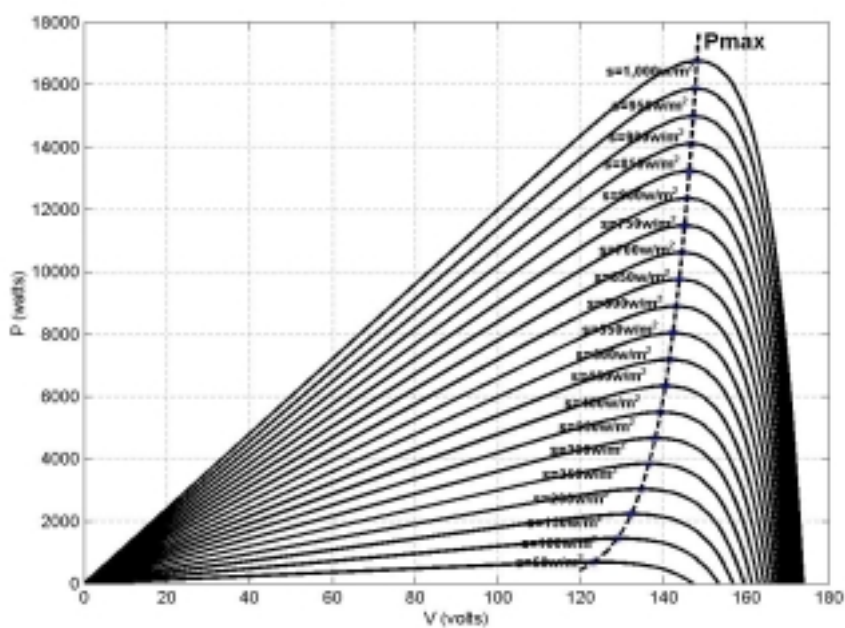
3.2.1 ค่ากำลังงานสูงสุดเมื่อความเข้มแสงอาทิตย์เปลี่ยนแปลง

การที่จะดำเนินการคำนวณหาค่ากำลังงานสูงสุดตลอดทั้งวันที่มีแสงอาทิตย์ได้นั้น จะต้องใช้ข้อมูลของแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ทำให้เกิดกำลังงานสูงสุดที่ความเข้มแสงค่าต่างๆ เพื่อเป็นแนวทางนำไปสู่สมการทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบทั่วไปที่สามารถใช้หาความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันที่ทำให้เกิดกำลังงานสูงสุดตลอดทั้งวันที่มีแสงได้ ดังนั้นในขั้นตอนแรก จึงได้ทำการสมมติปริมาณของแผงฟิวดิโวลต์เซลล์จำนวน 200 มอดูลขึ้นมา เพื่อเป็นตัวอย่างในการพิจารณา ซึ่งแผงฟิวดิโวลต์เซลล์นี้เป็นปริมาณที่เหมาะสมสำหรับระบบพลังงานผสมผสานของงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ เพราะต้องใช้งานแบบต่อเนื่องได้ทั้งวันอย่างอิสระ โดยได้ต่อเป็นแผงขนานกัน 25 แผง ($n_p = 25$) ซึ่งแต่ละแผงมีทั้งหมด 8 มอดูลต่ออนุกรมกันอยู่ (มอดูลหนึ่งประกอบด้วยเซลล์ทั้งหมด 36 เซลล์ต่ออนุกรมกัน ดังนั้น $n_s = 8 \cdot 36$) และได้ทำการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มแสง (S) ไปด้วย ซึ่งเมื่อ S เปลี่ยนแปลง ค่ากระแสไฟโวลต์ (I_{ph}) ก็จะเปลี่ยนแปลงไปด้วย (ค่า S จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่า I_{ph}) โดยแสดงความ

สัมพันธ์ของแรงดันกับกำลังไฟฟ้า และแรงดันกับกระแสไฟฟ้างภาพที่ 3.1 และ 3.2 ตามลำดับ และแสดงผลของกำลังงานสูงสุดที่ความเข้มแสงค่าต่างๆ ได้ด้วยตารางที่ 3.1 ดังนี้



ภาพที่ 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกำลังไฟฟ้าของแสงพิว 200 มิลลิวัตต์ เมื่อความเข้มแสงเปลี่ยนแปลง

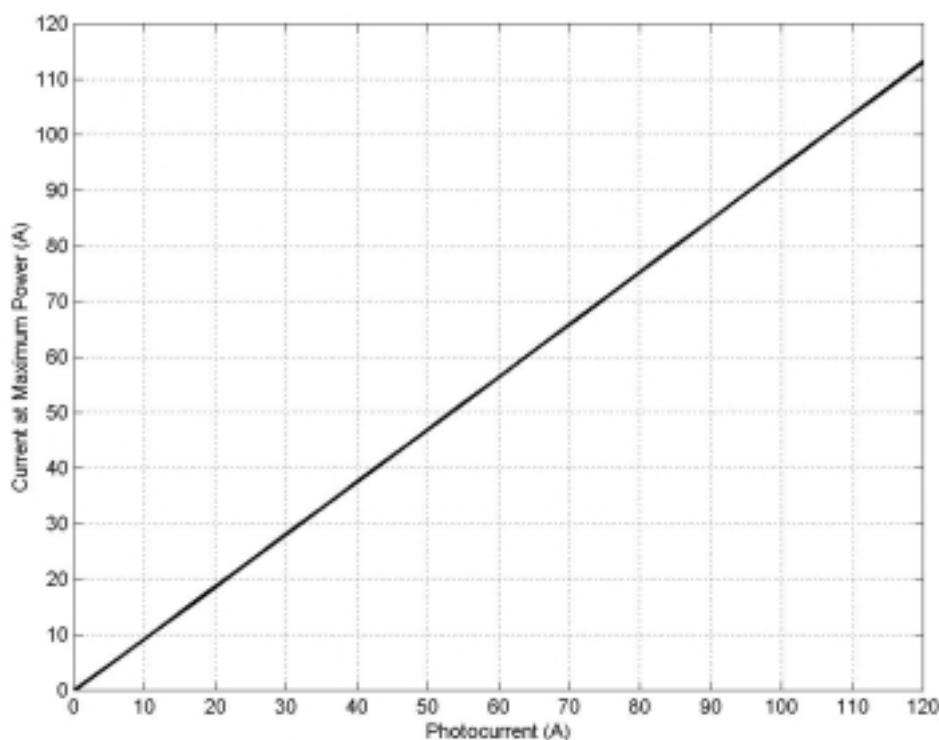


ภาพที่ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแสไฟฟ้าของแสงพิว 200 มิลลิวัตต์ เมื่อความเข้มแสงเปลี่ยนแปลง

ตารางที่ 3.1 ค่ากำลังงานสูงสุดของแผงพีวี 200 มอดูล เมื่อความเข้มแสงเปลี่ยนแปลง

ความเข้มแสง (W/m ²)	กระแสไฟโตน (A) [คูณด้วย 25 เนื่องจาก $n_p=25$]	$I_{P_{max}}$ (A)	$V_{P_{max}}$ (V)	P_{max} (W)
1,000	4.80·25	113.21	148.09	16,765
950	4.56·25	107.53	147.66	15,878
900	4.32·25	101.85	147.20	14,993
850	4.08·25	96.18	146.72	14,111
800	3.84·25	90.50	146.21	13,233
750	3.60·25	84.83	145.67	12,357
700	3.36·25	79.15	145.09	11,485
650	3.12·25	73.48	144.47	10,616
600	2.88·25	67.81	143.80	9,751
550	2.64·25	62.14	143.07	8,890
500	2.40·25	56.47	142.27	8,034
450	2.16·25	50.81	141.38	7,183
400	1.92·25	45.14	140.40	6,338
350	1.68·25	39.48	139.28	5,499
300	1.44·25	33.82	137.99	4,667
250	1.20·25	28.17	136.46	3,844
200	0.96·25	22.51	134.59	3,030
150	0.72·25	16.87	132.19	2,230
100	0.48·25	11.23	128.80	1,446
50	0.24·25	5.60	123.02	688

จากค่าของ $I_{P_{max}}$ ที่ความเข้มแสงค่าต่างๆ ที่แสดงในตารางที่ 3.1 เราสามารถหาความสัมพันธ์ของ $I_{P_{max}}$ เทียบกับ I_{ph} โดยการนำ $I_{P_{max}}$ และ I_{ph} ที่ความเข้มแสงค่าต่างๆ ไปพล็อตกราฟ พร้อมทั้งอาศัยการวิเคราะห์การถดถอยเพื่อหาความสัมพันธ์ของข้อมูล ซึ่งแสดงได้ดังภาพที่ 3.3 และแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (3-1)



ภาพที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสโฟโตกับกระแสที่ทำให้เกิดกำลังงานสูงสุด

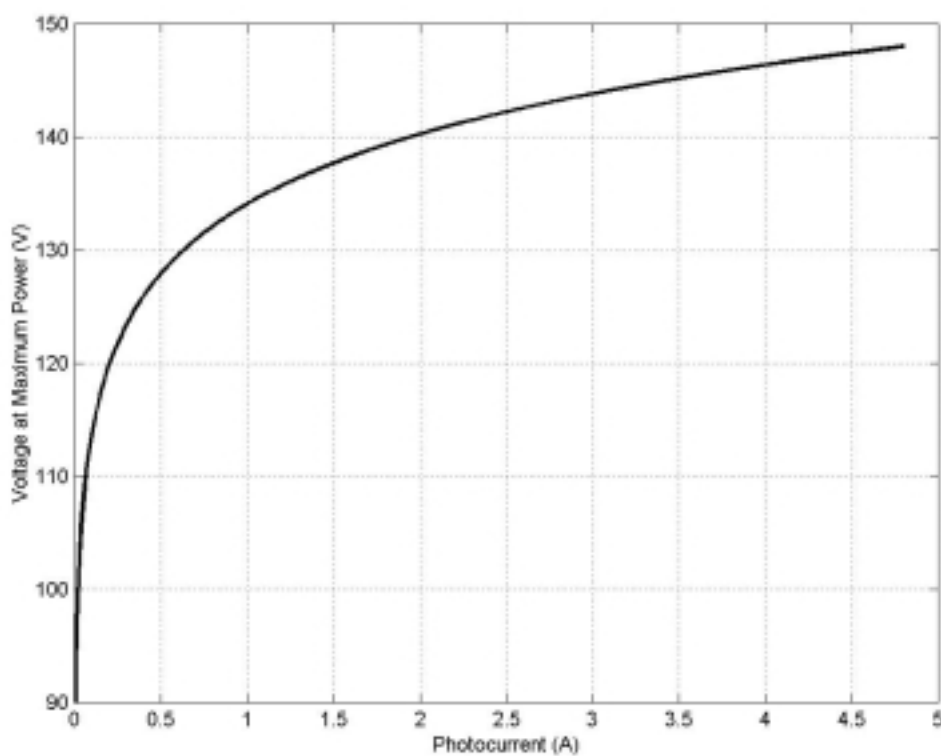
$$I_{P_{max}} = 0.9439 I_{ph} \quad (3-1)$$

จากสมการที่ (3-1) จะสังเกตเห็นว่า ค่าของ $I_{P_{max}}$ อยู่ในรูปทั่วไปแล้ว โดยจะไม่ขึ้นอยู่กับจำนวนมอดูลที่ต่อขนานกัน (n_p) กล่าวคือ ไม่ว่าการออกแบบจะมี n_p จำนวนเท่าใด ก็สามารถใช้ความสัมพันธ์ของ $I_{P_{max}}$ ในสมการที่ (3-1) ได้ ซึ่งลองพิจารณาหาความสัมพันธ์ของ $I_{P_{max}}$ ใหม่อีกครั้งที่ n_p เท่ากับ 15 และ 35 มอดูล ก็จะได้ค่า $I_{P_{max}}$ มีความสัมพันธ์เหมือนดังสมการที่ (3-1) เช่นกัน และจากค่าของ $I_{P_{max}}$ ที่ได้ในสมการที่ (3-1) เราจะใช้หาความสัมพันธ์ของ $V_{P_{max}}$ เทียบกับ I_{ph} โดยจากสมการที่ (2-1) ถ้าแรงแฟฟิวผลิต $I_{P_{max}}$ แล้ว ดังนั้นที่จุดนี้แรงแฟฟิวผลิต $V_{P_{max}}$ ด้วย ดังสมการที่ (3-2) จากนั้น นำสมการที่ (3-1) แทนค่าลงในสมการที่ (3-2) จะได้ความสัมพันธ์ของ $V_{P_{max}}$ เทียบกับ I_{ph} ดังสมการที่ (3-3)

$$I_{P_{\max}} = I_{ph} - I_{rs} \left[\exp\left(\frac{qV_{P_{\max}}}{kTAn_s}\right) - 1 \right] \quad (3-2)$$

$$V_{P_{\max}} = \frac{kTAn_s}{q} \ln \left[\left(\frac{0.0561}{I_{rs}} \right) I_{ph} + 1 \right] \quad (3-3)$$

จากสมการที่ (3-3) จะสังเกตเห็นว่า ค่าของ $V_{P_{\max}}$ จะขึ้นอยู่กับจำนวนเซลล์ที่ต่ออนุกรมกัน (n_s) โดยจะไม่ขึ้นกับจำนวนมอดูลที่ต่อขนานกัน (n_p) นำสมการที่ (3-3) มาพล็อตกราฟหาความสัมพันธ์ของ $V_{P_{\max}}$ เทียบกับ I_{ph} (เมื่อพิจารณาแผงพีวียู่ในรูปทั่วไป ซึ่งไม่ขึ้นอยู่กับจำนวน n_p จากค่าพารามิเตอร์ของแผงพีวี่ที่ผ่านมาจากบทที่แล้ว จึงได้ I_{ph} ที่ความเข้มแสง $1,000 \text{ W/m}^2$ มีค่าเทียบได้เท่ากับ 4.8 A) ซึ่งกรณีนี้มีจำนวนมอดูลที่อนุกรมในแต่ละแผงเท่ากับ 8 ($n_s = 8 \cdot 36$) จึงแสดงได้ดังภาพที่ 3.4 ซึ่งภาพที่ได้จะสอดคล้องกับผลในตารางที่ 3.1 (เนื่องจากแผงพีวี่พิจารณาอยู่ในรูปทั่วไปแล้ว ซึ่งไม่ขึ้นอยู่กับจำนวน n_p ดังนั้นแกนของ I_{ph} ที่ได้ จะต้องมามีค่าเป็นจำนวนเท่าของ n_p อย่างเช่นกรณีที่ n_p เท่ากับ 25 แกนของ I_{ph} จะต้องคูณด้วย 25)



ภาพที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟโต่กับแรงดันที่ทำให้เกิดกำลังงานสูงสุด

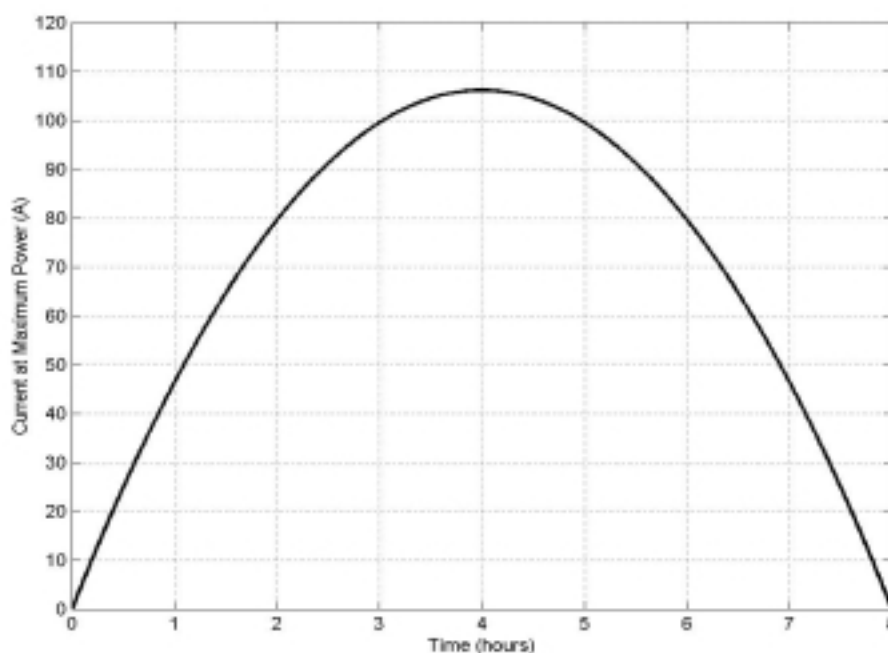
3.2.2 ค่ากระแสและแรงดันที่ทำให้เกิดกำลังงานสูงสุด

จากค่าความเข้มแสงอาทิตย์ในหนึ่งวันที่มีแสงของสมการที่ (2-24) จะนำมาหาความสัมพันธ์ของ $I_{P_{max}}$ และ $V_{P_{max}}$ ในหนึ่งวันที่มีแสง เพื่อจะทราบได้ว่า ในแต่ละวันที่มีแสงเดคนั้น แสงพีวีผลิตกำลังงานสูงสุดออกมาเป็นปริมาณเท่าใด

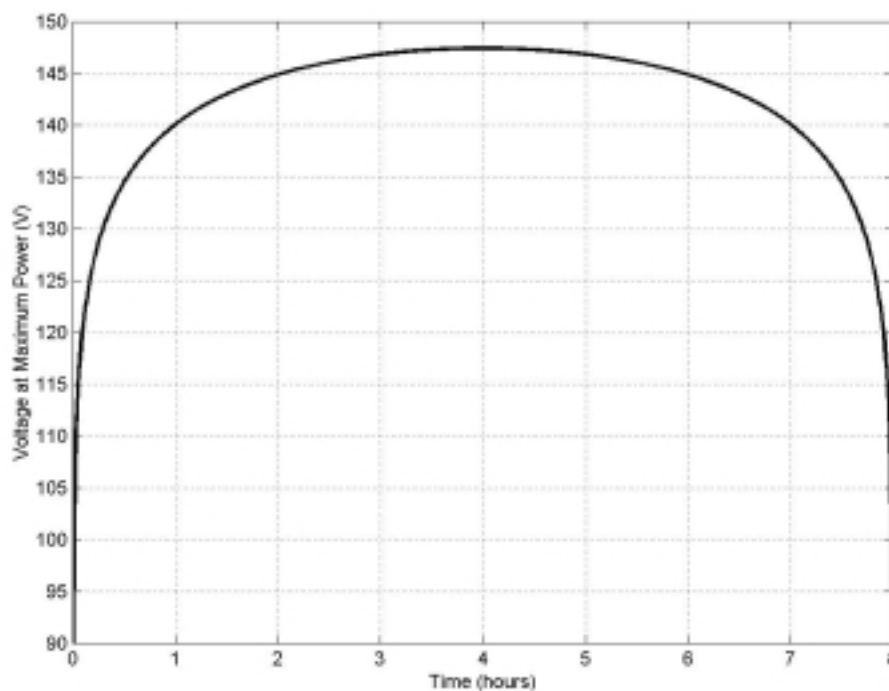
โดยเราทราบว่า ค่า S เป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่า I_{ph} และจากพารามิเตอร์ของแผงพีวี ในกรณีหนึ่งมอดูล ($n_p = 1, n_s = 36$) ค่า I_{ph} ที่ความเข้มแสง $1,000 \text{ W/m}^2$ จะมีค่าเท่ากับ 4.8 A ดังนั้นจากสมการที่ (3-1) และ (3-3) จึงได้ความสัมพันธ์ของ $I_{P_{max}}$ และ $V_{P_{max}}$ ตลอดทั้งวันที่มีแสง ดังสมการที่ (3-4) และ (3-5) ตามลำดับ และเมื่อสมมติให้แผงพีวีมีจำนวนทั้งสิ้น 200 มอดูล ($n_p = 25, n_s = 8 \cdot 36$) ก็จะได้ความสัมพันธ์ของ $I_{P_{max}}$ และ $V_{P_{max}}$ ตลอดทั้งวันที่มีแสง ดังแสดงด้วยภาพที่ 3.5 และ 3.6 ตามลำดับ (หมายเหตุ: เวลาที่ 0 หมายถึง 08.00 น. และเวลาที่ 8 ชั่วโมง หมายถึง 16.00 น.) ส่วนกำลังงานสูงสุด (P_{max}) ตลอดทั้งวันที่มีแสง ก็สามารถหาได้จากผลคูณของกระแสและแรงดันที่ค่าอื่นๆ

$$I_{P_{max}} = 0.9439[937.5 - 58.59(t-4)^2] \left(\frac{48n_p}{1000} \right) \quad (3-4)$$

$$V_{P_{max}} = \frac{kTAn_s}{q} \ln \left[\left(\frac{0.0561}{I_{rs}} \right) \left(\frac{48}{1000} \right) (937.5 - 58.59(t-4)^2) + 1 \right] \quad (3-5)$$



ภาพที่ 3.5 ค่ากระแสที่ทำให้เกิดกำลังงานสูงสุดตลอดทั้งวันที่มีแสง



ภาพที่ 3.6 ค่าแรงดันที่ทำให้เกิดกำลังงานสูงสุดตลอดทั้งวันที่มีแสง

3.3 การหาค่าอัตราส่วนการแปลงที่เหมาะสม

ตัวควบคุม MPPT จะทำงานควบคู่ไปกับ ดีซี/ดีซี คอนเวอร์เตอร์ ซึ่งทำงานด้วยค่าอัตราส่วนการแปลง D (transformation ratio) ที่เหมาะสมกับสภาวะการทำงานของแหล่งพลังงานและโหลด โดยจะแบ่งการพิจารณาค่า D ออกเป็น 3 กรณี ดังนี้

3.3.1 แผงพีวีจ่ายพลังงานโดยตรงให้แก่มอเตอร์

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ เป็นแบบกระตุ้นฟลักซ์แยกส่วน ซึ่งใช้งานด้วยการปรับแรงดันอาร์เมเจอร์โดยมีความเข้มสนามเต็มพิกัด โดยที่สภาวะคงตัวแรงดันทางด้านอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์เมื่อขับปั๊มแสดงได้ด้วยสมการที่ (2-15)

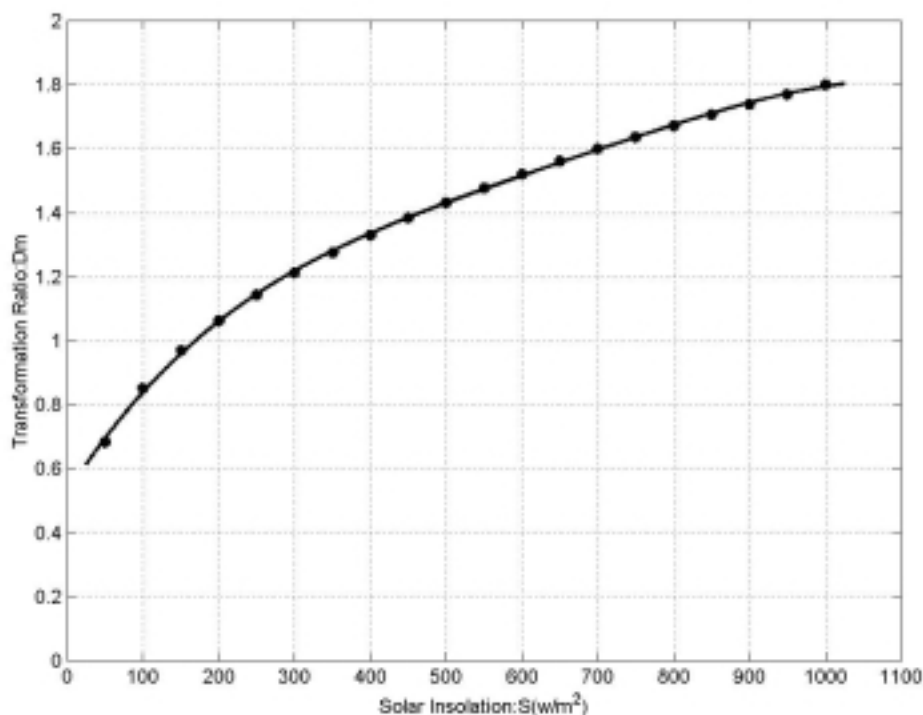
ถ้าแผงพีวีจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดเพื่อใช้ขับมอเตอร์ผ่าน ดีซี/ดีซี คอนเวอร์เตอร์ จากสมการที่ (2-5) จึงได้ค่าอัตราส่วนการแปลงเมื่อแผงพีวีจ่ายพลังงานโดยตรงให้แก่มอเตอร์ (D_m) ดังสมการที่ (3-6) ซึ่งเมื่อแทนสมการที่ (3-6) ลงในสมการที่ (2-15) จะได้ผลลัพธ์ดังสมการที่ (3-7) ซึ่งไม่เป็นสมการเชิงเส้น สามารถแก้สมการได้โดยใช้การคำนวณเชิงตัวเลขด้วยวิธีการของนิวตัน

$$D_m = \frac{V_t}{V_{Pmax}} = \frac{I_{Pmax}}{I_a} \quad (3-6)$$

$$D_m - \frac{k_b}{V_{P_{max}}} \left(\frac{-B}{2k} + \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{B}{k}\right)^2 + \left(\frac{4k_b I_{P_{max}}}{D_m k}\right)} \right) - \frac{I_{P_{max}} R_a}{D_m V_{P_{max}}} = 0 \quad (3-7)$$

จากสมการที่ (3-7) เมื่อสมมติให้ที่ความเข้มแสงใดๆ แสงพีวีผลิต $I_{P_{max}} = 13.25$ A และผลิต $V_{P_{max}} = 110$ V แล้ว ดังนั้นถ้าต้องการให้มอเตอร์ทำงานที่ก่าลังงานสูงสุด ณ จุดนี้ จากการคำนวณด้วยโปรแกรม จะได้ค่า D_m เท่ากับ 1.00 ซึ่งแสดงว่าค่าจากการคำนวณถูกต้อง เนื่องจากในบทที่ผ่านมา ที่สภาวะคงตัว มอเตอร์มี $I_a = 13.25$ A ที่ $V_t = 110$ V

จากตารางที่ 3.1 เมื่อทราบ $I_{P_{max}}$ และ $V_{P_{max}}$ ที่ความเข้มแสงค่าต่างๆ โดยสมมติให้แสงพีวีมีจำนวนทั้งสิ้น 200 มอดูล ถ้าต้องการให้มอเตอร์ทำงานที่ก่าลังงานสูงสุด ณ จุดเหล่านี้จะต้องปรับค่า D_m เทียบกับความเข้มแสงที่ค่าต่างๆ ดังแสดงด้วยตารางที่ 3.2 ซึ่งจะสังเกตเห็นว่า ค่าที่ได้มีความสอดคล้องกับสมการที่ (2-15) ร่วมกับสมการที่ (3-6) และเมื่อนำค่า D_m ไปพล็อตกราฟพร้อมทั้งอาศัยการวิเคราะห์การถดถอยเพื่อหาความสัมพันธ์ของข้อมูล ดังแสดงด้วยภาพที่ 3.7 จะสังเกตเห็นว่า ดีซี/ดีซี คอนเวอร์เตอร์ ในกรณีนี้เป็นแบบ บัค/บูสต์ คอนเวอร์เตอร์ โดยที่ความเข้มแสงต่ำกว่า 150 W/m² D_m จะมีค่าน้อยกว่า 1 ซึ่งจะเป็น บัคคอนเวอร์เตอร์ กรณีที่ความเข้มแสงสูงกว่านี้ คอนเวอร์เตอร์จะเป็นชนิดบูสต์ ซึ่ง D_m จะมีค่ามากกว่า 1



ภาพที่ 3.7 ค่า D_m ที่ทำให้เกิดก่าลังงานสูงสุดในแต่ละความเข้มแสง

ตารางที่ 3.2 การปรับค่า D_m ที่เหมาะสมเมื่อความเข้มแสงเปลี่ยนแปลง

ความเข้มแสง (W/m^2)	I_{Pmax} (A)	V_{Pmax} (V)	D_m
1,000	113.21	148.09	1.8011
950	107.53	147.66	1.7706
900	101.85	147.20	1.7391
850	96.18	146.72	1.7065
800	90.50	146.21	1.6725
750	84.83	145.67	1.6372
700	79.15	145.09	1.6003
650	73.48	144.47	1.5616
600	67.81	143.80	1.5210
550	62.14	143.07	1.4782
500	56.47	142.27	1.4327
450	50.81	141.38	1.3842
400	45.14	140.40	1.3319
350	39.48	139.28	1.2753
300	33.82	137.99	1.2130
250	28.17	136.46	1.1435
200	22.51	134.59	1.0640
150	16.87	132.19	0.9701
100	11.23	128.80	0.8521
50	5.60	123.02	0.6834

เพื่อให้การหาค่า D_m ง่ายขึ้น จะพิจารณาว่าทอมแรงฟีดวิสคอสฟริกชันของมอเตอร์ มีค่าน้อยมาก (Saied et al., 1991) ดังนั้นที่สภาวะคงตัวแรงดันทางด้านอาร์มเจอร์ของมอเตอร์เมื่อขับป้อนแสงได้ด้วยสมการที่ (2-17) ซึ่งเมื่อแทนสมการที่ (3-6) ลงในสมการที่ (2-17) จะได้ผลลัพธ์ดังสมการที่ (3-8) ซึ่งอยู่ในรูปสมการพหุนามอันดับ 3 โดยค่า D_m ที่ได้ ก็จะมีค่าใกล้เคียงกับเมื่อพิจารณาทอมแรงฟีดวิสคอสฟริกชัน

$$D_m^3 - \frac{R_a I_{Pmax}}{V_{Pmax}} D_m - \frac{(k_b^{1.5})}{V_{Pmax}} \sqrt{\frac{I_{Pmax}}{k}} = 0 \quad (3-8)$$

3.3.2 แผงพีวีจ่ายพลังงานโดยตรงให้แก่แบตเตอรี่

แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดแม้ว่าจะมีราคาถูก หาได้ง่ายในประเทศ แต่ก็มีลักษณะสมบัติการทำงานที่ไม่เป็นเชิงเส้นอย่างมากทั้งในขณะชาร์จและดิสชาร์จ เพื่อให้ง่ายในการพิจารณาหาค่าอัตราส่วนการแปลงเมื่อแผงพีวีจ่ายพลังงานโดยตรงให้แก่แบตเตอรี่ (D_b) ดังนั้นสมการที่ (2-7) จึงพิจารณาเฉพาะช่วงที่มีลักษณะสมบัติเป็นเชิงเส้นเท่านั้น (Applebaum, 1988) ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ (3-9)

$$V_b = V_0 + (R_{tot} \cdot I_b) \quad (3-9)$$

ถ้าแผงพีวีจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดให้แก่แบตเตอรี่ผ่าน ดีซี/ดีซี คอนเวอร์เตอร์ จากสมการที่ (2-5) จึงได้ค่า D_b ดังสมการที่ (3-10) ซึ่งเมื่อแทนสมการที่ (3-10) ลงในสมการที่ (3-9) จะได้สมการที่ (3-11) ซึ่งอยู่ในรูปสมการพหุนามอันดับ 2 เมื่อพิจารณาเฉพาะ D_b ที่มีค่าบวก จะได้ผลลัพธ์ดังสมการที่ (3-12)

$$D_b = \frac{V_b}{V_{Pmax}} = \frac{I_{Pmax}}{I_b} \quad (3-10)$$

$$D_b^2 - \frac{V_0}{V_{Pmax}} D_b - \frac{I_{Pmax} R_{tot}}{V_{Pmax}} = 0 \quad (3-11)$$

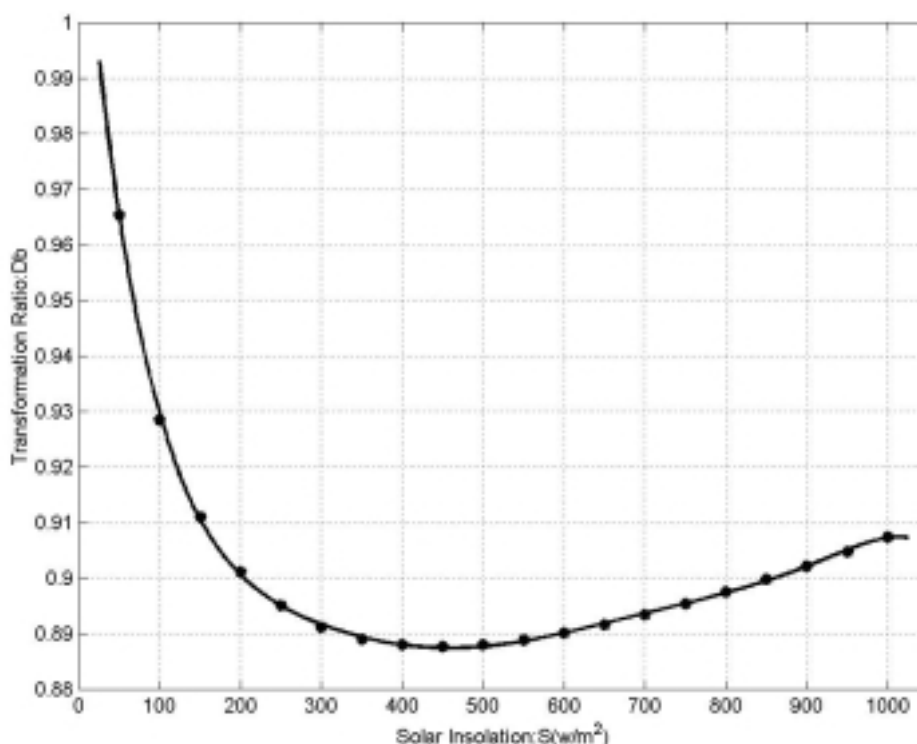
$$D_b = \frac{1}{2} \left[\frac{V_0}{V_{Pmax}} + \sqrt{\left(\frac{V_0}{V_{Pmax}} \right)^2 + \frac{4I_{Pmax} R_{tot}}{V_{Pmax}}} \right] \quad (3-12)$$

จากตารางที่ 3.1 เมื่อทราบ I_{Pmax} และ V_{Pmax} ที่ความเข้มแสงค่าต่างๆ โดยสมมติให้แผงพีวีมีจำนวนทั้งสิ้น 200 มอดูล และทราบค่า V_0 และ R_{tot} มีค่าเท่ากับ 118 V และ $(10/5) \cdot 6.56 \cdot 10^{-2} \Omega$ ตามลำดับ ซึ่งได้จากค่าพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ขณะชาร์จจากบทที่ผ่านมา โดยการสมมติให้แบตเตอรี่มีจำนวนทั้งสิ้น 50 ลูก ต่อเป็นชุดขนานกัน 5 ชุด ซึ่งแต่ละชุดมีแบตเตอรี่ 10 ลูก ต่ออนุกรมกันอยู่ ซึ่งเป็นจำนวนที่เหมาะสมสำหรับระบบพลังงานผสมผสานของงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ถ้าต้องการให้แบตเตอรี่ได้รับกำลังงานสูงสุด ณ จุดเหล่านี้ นั่น จะต้องปรับค่า D_b เทียบกับความเข้มแสงที่ค่า

ต่างๆ ดังแสดงด้วยตารางที่ 3.3 ซึ่งจะสังเกตเห็นว่า ค่าที่ได้มีความสอดคล้องกับสมการที่ (3-9) ร่วมกับสมการที่ (3-10) และเมื่อนำค่า D_b ไปพล็อตกราฟพร้อมทั้งอาศัยการวิเคราะห์การถดถอยเพื่อหาความสัมพันธ์ของข้อมูล ดังแสดงด้วยภาพที่ 3.8 จะสังเกตเห็นว่า ดีซี/ดีซี คอนเวอร์เตอร์ ในกรณีนี้เป็นแบบ บั๊กคอนเวอร์เตอร์

ตารางที่ 3.3 การปรับค่า D_b ที่เหมาะสมเมื่อความเข้มแสงเปลี่ยนแปลง

ความเข้มแสง (W/m^2)	I_{Pmax} (A)	V_{Pmax} (V)	D_b
1,000	113.21	148.09	0.9074
950	107.53	147.66	0.9047
900	101.85	147.20	0.9022
850	96.18	146.72	0.8998
800	90.50	146.21	0.8975
750	84.83	145.67	0.8954
700	79.15	145.09	0.8934
650	73.48	144.47	0.8916
600	67.81	143.80	0.8901
550	62.14	143.07	0.8889
500	56.47	142.27	0.8880
450	50.81	141.38	0.8877
400	45.14	140.40	0.8880
350	39.48	139.28	0.8890
300	33.82	137.99	0.8912
250	28.17	136.46	0.8950
200	22.51	134.59	0.9011
150	16.87	132.19	0.9110
100	11.23	128.80	0.9285
50	5.60	123.02	0.9654



ภาพที่ 3.8 ค่า D_o ที่ทำให้เกิดกำลังงานสูงสุดในแต่ละความเข้มแสง

3.3.3 แผงพีวีจ่ายพลังงานให้ทั้งมอเตอร์และแบตเตอรี่

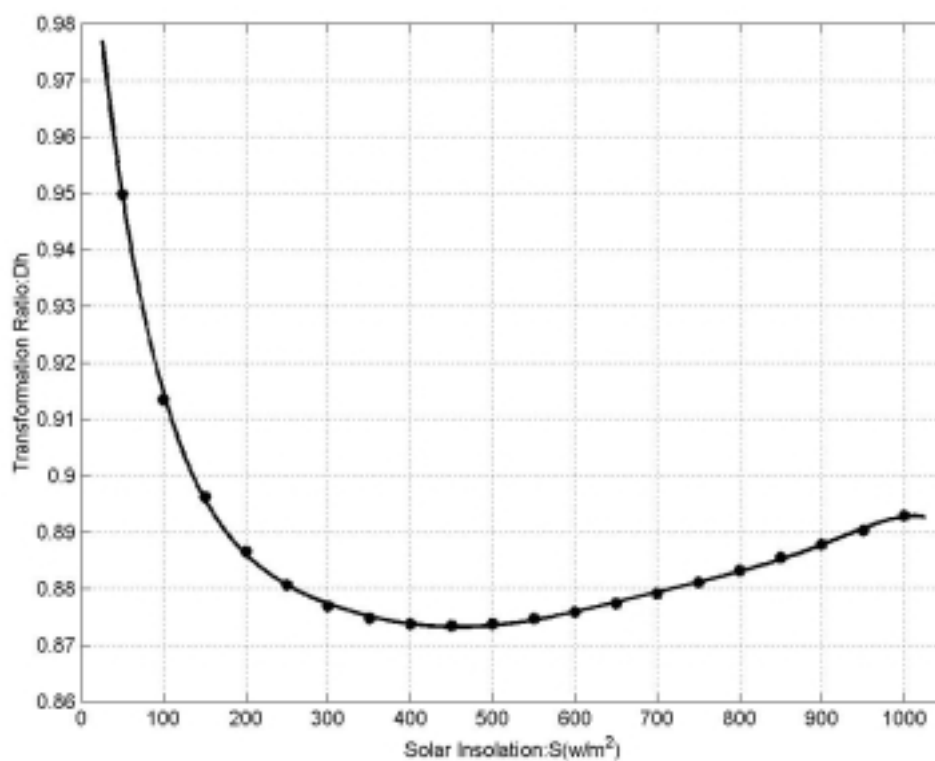
งานที่ปรากฏมาก่อนของ (Zinger, and Braunstein, 1981) ได้พิจารณามอเตอร์เป็นเพียงความต้านทานตัวหนึ่งที่ต่อขนานกับแบตเตอรี่เท่านั้น แต่ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้พิจารณามอเตอร์ตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ถูกต้องดังบทที่ผ่านมา โดยค่าแรงดันที่ตกคร่อมมอเตอร์และแบตเตอรี่จะมีค่าเท่ากัน ซึ่งเท่ากับค่าแรงดันที่แผงพีวีผลิตได้ ส่วนกระแสที่แผงพีวีผลิตได้จะมีค่าเท่ากับกระแสที่ใช้ในการขับมอเตอร์และกระแสที่ใช้ในการชาร์จแบตเตอรี่

ถ้าแผงพีวีจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดเพื่อใช้ขับมอเตอร์และจ่ายให้แบตเตอรี่ผ่าน ดิซี/ดิซีคอนเวอร์เตอร์ จากสมการที่ (2-5) จึงได้ค่าอัตราส่วนการแปลงเมื่อแผงพีวีจ่ายพลังงานให้ทั้งมอเตอร์และแบตเตอรี่ (D_h) ดังสมการที่ (3-13) ซึ่งเมื่อแทนสมการที่ (2-15) และ (3-9) ลงในสมการที่ (3-13) จะได้ผลลัพธ์ดังสมการที่ (3-14) ซึ่งไม่เป็นสมการเชิงเส้น สามารถแก้สมการได้โดยใช้การคำนวณเชิงตัวเลขด้วยวิธีการของนิวตัน

$$D_h = \frac{V_t}{V_{pmax}} = \frac{V_b}{V_{pmax}} = \frac{I_{pmax}}{I_a + I_b} \quad (3-13)$$

$$\frac{k_b}{2} \sqrt{\left(\frac{B}{k}\right)^2 + 4k_b \left(\frac{I_{P_{max}} R_{tot} - D_h^2 V_{P_{max}} + D_h V_0}{D_h k R_{tot}}\right)} + R_a \left(\frac{I_{P_{max}} R_{tot} - D_h^2 V_{P_{max}} + D_h V_0}{D_h R_{tot}}\right) - D_h V_{P_{max}} - \frac{k_b B}{2k} = 0 \quad (3-14)$$

จากตารางที่ 3.1 เมื่อทราบ $I_{P_{max}}$ และ $V_{P_{max}}$ ที่ความเข้มแสงค่าต่างๆ โดยสมมติให้แผงพีวีมีจำนวนทั้งสิ้น 200 โมดูล และทราบค่า V_0 และ R_{tot} เมื่อสมมติให้แบตเตอรี่มีจำนวนทั้งสิ้น 50 ลูก ถ้าต้องการให้มอเตอร์และแบตเตอรี่ได้รับกำลังงานสูงสุด ณ จุดเหล่านั้นนั้น จะต้องปรับค่า D_h เทียบกับความเข้มแสงที่ค่าต่างๆ ดังแสดงด้วยตารางที่ 3.4 ซึ่งจะสังเกตเห็นว่า ค่าที่ได้มีความสอดคล้องกับสมการที่ (2-15) ร่วมกับสมการที่ (3-9) และสมการที่ (3-13) และเมื่อนำค่า D_h ไปพล็อตกราฟพร้อมทั้งอาศัยการวิเคราะห์การถดถอยเพื่อหาความสัมพันธ์ของข้อมูล ดังแสดงด้วยภาพที่ 3.9 จะสังเกตเห็นว่า คีซี/คีซี คอนเวอร์เตอร์ ในกรณีนี้เป็นแบบ บั๊กคอนเวอร์เตอร์



ภาพที่ 3.9 ค่า D_h ที่ทำให้เกิดกำลังงานสูงสุดในแต่ละความเข้มแสง

ตารางที่ 3.4 การปรับค่า D_h ที่เหมาะสมเมื่อความเข้มแสงเปลี่ยนแปลง

ความเข้มแสง (W/m^2)	I_{Pmax} (A)	V_{Pmax} (V)	D_h
1,000	113.21	148.09	0.8929
950	107.53	147.66	0.8903
900	101.85	147.20	0.8878
850	96.18	146.72	0.8855
800	90.50	146.21	0.8832
750	84.83	145.67	0.8811
700	79.15	145.09	0.8791
650	73.48	144.47	0.8774
600	67.81	143.80	0.8759
550	62.14	143.07	0.8747
500	56.47	142.27	0.8738
450	50.81	141.38	0.8735
400	45.14	140.40	0.8737
350	39.48	139.28	0.8748
300	33.82	137.99	0.8769
250	28.17	136.46	0.8806
200	22.51	134.59	0.8866
150	16.87	132.19	0.8963
100	11.23	128.80	0.9135
50	5.60	123.02	0.9498

3.4 การลดค่ากำลังงานสูญเสียในมอเตอร์ให้ต่ำสุด

เนื่องจากกำลังงานที่ได้จากแผงพีวีมีปริมาณจำกัด การขับโหลดมอเตอร์จึงต้องให้มั่นใจถึงการประหยัดพลังงาน ในงานวิจัยส่วนใหญ่ การพิจารณาถึงกำลังงานสูญเสียในมอเตอร์จะไม่จ่ายฟิลด์ที่พิกัด เนื่องจากกำลังงานที่มอเตอร์ต้องการส่วนใหญ่นั้น มีค่าน้อยกว่ากำลังงานที่พิกัดอยู่แล้ว การจ่ายฟิลด์ที่มากเกินไปจนความจำเป็นยอมทำให้มอเตอร์สูญเสียกำลังงานเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ มีความจำเป็นต้องจ่ายฟิลด์เต็มพิกัด เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของมอเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นสถานะที่ฟิลด์พิกัด

ที่สภาวะคงตัว กำลังงานของโหลดแสดงได้ดังสมการที่ (3-15) ซึ่งจะมีค่าเท่ากับกำลังงานขาออกของมอเตอร์ (P_{out}) ส่วนกำลังงานขาเข้าของมอเตอร์ (P_{in}) จะมีค่าเท่ากับกำลังงานขาออกของมอเตอร์รวมกับกำลังงานสูญเสียทั้งหมดของมอเตอร์ (P_{Σ}) แสดงได้ดังสมการที่ (3-16)

$$P_L = T_L \omega = k\omega^3 = k \left(\frac{V_t - I_a R_a}{k_b} \right)^3 \quad (3-15)$$

$$P_{in} = V_t I_a = P_{out} + P_{\Sigma} \quad (3-16)$$

ซึ่งกำลังงานสูญเสียทั้งหมดของมอเตอร์ จะประกอบไปด้วย

- กำลังงานสูญเสียในขดลวดอาร์เมเจอร์ (armature losses)
- กำลังงานสูญเสียในขดลวดฟิลด์ (field winding losses)
- กำลังงานสูญเสียในแปรงถ่าน (brush losses)
- กำลังงานสูญเสียสเตร (stray losses)
- กำลังงานสูญเสียเนื่องจากความฝืดและแรงต้านลม (friction and windage losses)
- กำลังงานสูญเสียในแกนเหล็ก (core losses)

$$\text{โดย } \text{กำลังงานสูญเสียในขดลวดอาร์เมเจอร์} = I_a^2 R_a \quad (3-17)$$

$$\text{กำลังงานสูญเสียในขดลวดฟิลด์} = I_f^2 R_f \quad (3-18)$$

$$\text{กำลังงานสูญเสียในแปรงถ่าน (Chapman, 1991)} = 2I_a \quad (3-19)$$

กำลังงานสูญเสียสเตร์ มีค่าเท่ากับ 0.5% ของกำลังงานพิกัด (P_n) สำหรับมอเตอร์ที่มีการชดเชย (compensated) และมีค่าเท่ากับ 1% ในกรณีที่มอเตอร์ไม่มีการชดเชย (uncompensated) (Margaris, Goutas, Doulgeri, and Paschali, 1991) ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาว่าเป็นมอเตอร์ที่มีการชดเชยแล้ว ดังนั้น

$$\text{กำลังงานสูญเสียสเตร์} = 0.5\% P_n \quad (3-20)$$

$$\begin{aligned} \text{กำลังงานสูญเสียเนื่องจากความถี่และความต้านลม} &= fw \cdot P_{in} \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2 \\ &= \frac{fw \cdot V_t \cdot I_a}{\omega_n^2} \left(\frac{V_t - I_a R_a}{k_b} \right)^2 \end{aligned} \quad (3-21)$$

สมการที่ (3-21) ได้จาก (Yao et al., 1995) ซึ่ง fw คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของความถี่และความต้านลมที่พิกัด โดยในทางปฏิบัติ fw มีค่าอยู่ระหว่าง 0.02 - 0.05 ในงานวิจัยนี้จะพิจารณา fw มีค่าเท่ากับ 0.05

$$\text{กำลังงานสูญเสียในแกนเหล็ก} = P_{hn} \frac{\omega I_f^2}{\omega_n I_{fn}^2} + P_{en} \left(\frac{\omega I_f}{\omega_n I_{fn}} \right)^2$$

โดยกำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กจะประกอบไปด้วยกำลังงานสูญเสียจากฮิสเทอรีซิส (hysteresis losses) และกำลังงานสูญเสียจากกระแสวน (eddy current losses) ซึ่ง P_{hn} และ P_{en} คือค่ากำลังงานสูญเสียจากฮิสเทอรีซิสและกำลังงานสูญเสียจากกระแสวนที่พิกัดตามลำดับ โดยกำลังงานสูญเสียจากฮิสเทอรีซิสจะมีค่าประมาณ 5 % ของกำลังงานสูญเสียทั้งหมดในแกนเหล็ก (Hippner, Yamada, and Miauno, 1999) ในงานวิจัยนี้เป็นการป้อนฟิลด์เต็มพิกัดคงที่ตลอด จึงได้ $I_f = I_{fn}$ ดังนั้น

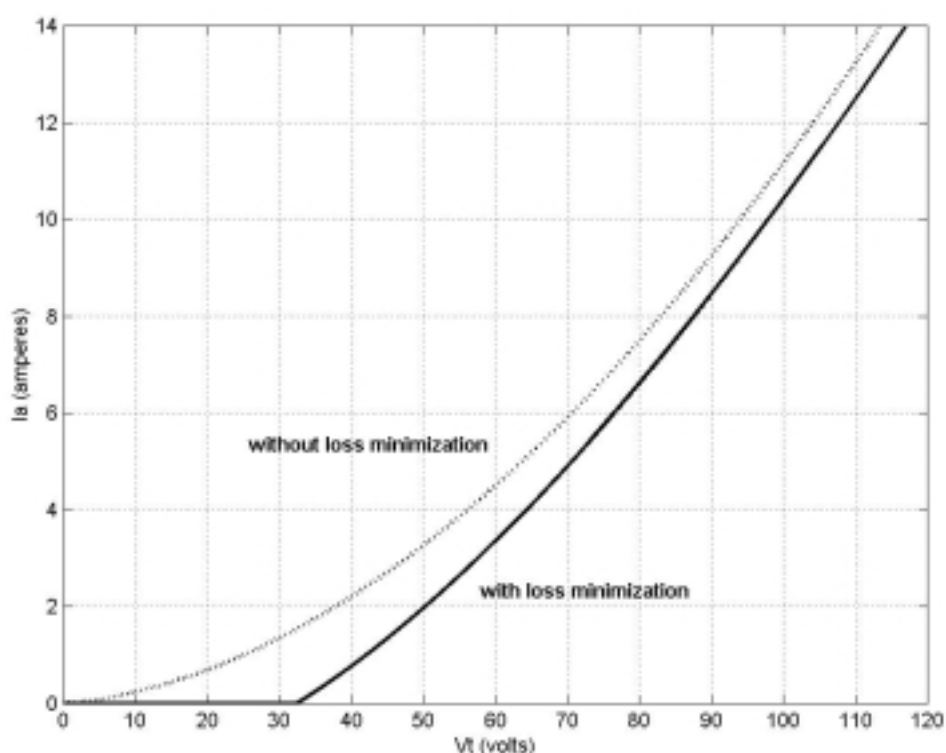
$$\text{กำลังงานสูญเสียในแกนเหล็ก} = \frac{P_{hn}}{\omega_n} \left(\frac{V_t - I_a R_a}{k_b} \right) + \frac{P_{en}}{\omega_n^2} \left(\frac{V_t - I_a R_a}{k_b} \right)^2 \quad (3-22)$$

เนื่องจากกำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กมีค่าน้อยมาก (Alghuwainem, 1992) ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงไม่นำมาพิจารณา แทนค่า P_{out} และ P_{Σ} ลงในสมการที่ (3-16) และทำการหาค่า

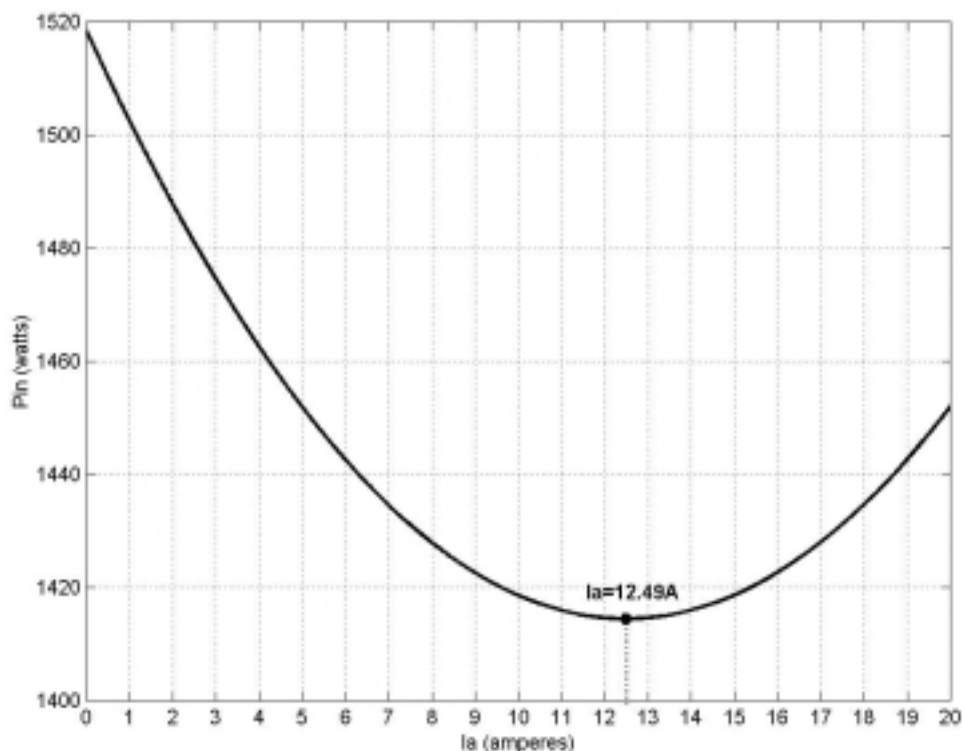
กำลังงานขาเข้าต่ำสุด โดยการหาอนุพันธ์อันดับที่หนึ่งเทียบกับ I_a แล้วให้เท่ากับศูนย์ ($dP_{in}/dI_a = 0$) ซึ่งจะได้ผลลัพธ์อยู่ในรูปพหุนามอันดับ 2 แสดงได้ดังสมการที่ (3-23)

$$3k \left(\frac{V_t - I_a^* R_a}{k_b} \right)^2 \left(\frac{-R_a}{k_b} \right) + 2I_a^* R_a + 2 + 2 \left(\frac{f_w V_t I_a^*}{\omega_n^2} \right) \left(\frac{V_t - I_a^* R_a}{k_b} \right) \left(\frac{-R_a}{k_b} \right) + \left(\frac{f_w V_t}{\omega_n^2} \right) \left(\frac{V_t - I_a^* R_a}{k_b} \right)^2 = 0 \quad (3-23)$$

เมื่อ I_a^* คือ กระแสอาร์เมเจอร์ที่ทำให้เกิดกำลังงานขาเข้าของมอเตอร์ต่ำสุดเมื่อพิจารณากำลังงานสูญเสียต่างๆ ของมอเตอร์ โดย I_a^* จะขึ้นอยู่กับค่า V_t อย่างเดียวเท่านั้น เนื่องจากพารามิเตอร์ตัวอื่นๆ คงที่หมด ซึ่งสามารถเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ เมื่อมีการพิจารณารลดค่ากำลังงานสูญเสียให้ต่ำสุดและเมื่อยังไม่มีการพิจารณา ดังแสดงด้วยภาพที่ 3.10 โดยที่ค่าแรงดันพิกัด $V_t = 110$ V จะมีค่า $I_a^* = 12.49$ A เท่านั้น ซึ่งจะมีค่าน้อยกว่าเมื่อยังไม่พิจารณากำลังงานสูญเสียในมอเตอร์ (13.25 A) จากบทที่ผ่านมา และสามารถแสดงกำลังงานขาเข้าของมอเตอร์ต่ำที่สุดที่สัมพันธ์กับ I_a^* ค่านี้ ได้ดังภาพที่ 3.11



ภาพที่ 3.10 ผลการเปรียบเทียบแรงดันและกระแสอาร์เมเจอร์
เมื่อพิจารณาลดค่ากำลังงานสูญเสียให้ต่ำสุด



ภาพที่ 3.11 กระแสอาร์เมเจอร์ที่ทำให้เกิดกำลังงานขาเข้าของมอเตอร์ต่ำที่สุด

จากภาพที่ 3.10 จะสังเกตเห็นว่า ที่แรงดันอาร์เมเจอร์ค่าเดียวกัน ค่ากระแสอาร์เมเจอร์เมื่อพิจารณาการลดค่ากำลังงานสูญเสียให้มีค่าต่ำที่สุดจะมีค่าน้อยกว่าเมื่อยังไม่มีมีการพิจารณา กระแสอาร์เมเจอร์ที่เหมาะสมที่สุดเป็น 12.49 A เมื่อมอเตอร์ทำงานที่แรงดันพิกัด 110 V จากสมการ (3-16) เมื่อพิจารณา P_{out} ให้แทนด้วยสมการ (3-15) และ P_{Σ} เป็นผลรวมทางพีชคณิตของกำลังงานสูญเสียทุกพจน์ จะได้ความสัมพันธ์แสดง P_{in} ดังต่อไปนี้

$$P_{in} = k \left(\frac{V_t - I_a R_a}{k_b} \right)^3 + I_a^2 R_a + I_f^2 R_f + 2I_a + 0.5\%P_n + \frac{fw \cdot V_t \cdot I_a}{\omega_n^2} \left(\frac{V_t - I_a R_a}{k_b} \right)^2 \quad (3-24)$$

เมื่อแทน I_a^* ในสมการ (3-24) ด้วยกระแสในช่วง 0-20 A ผลคำนวณ P_{in} แสดงได้ดังภาพที่ 3.11 ซึ่งอาจสังเกตเห็นได้ชัดเจนว่า P_{in} มีค่าต่ำที่สุดเมื่อกระแสเป็น 12.49 A นั้นหมายถึง กำลังงานสูญเสียในมอเตอร์มีค่าน้อยที่สุดด้วย

3.5 สรุป

ในบทนี้เป็นการนำเสนอข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาระบบพลังงานผสมผสานให้มีประสิทธิภาพสูงเชิงการใช้พลังงาน ส่วนแรกที่นำเสนอ เป็นการพิจารณาหาค่ากระแสและแรงดันตลอดทั้งวันจากแผงพีวี ที่ทำให้เกิดกำลังงานสูงสุดที่ความเข้มแสงอาทิตย์ค่าต่างๆ ในส่วนที่สอง เป็นการวินิจฉัยค่าอัตราส่วนการแปลง (D) ของ ดีซี/ดีซี คอนเวอร์เตอร์ ที่เหมาะสมที่สุดระหว่างแหล่งจ่ายพลังงานไปยังโหลด โดยการดำเนินงานเช่นนี้จะต้องกระทำเป็นรายกรณีขึ้นอยู่กับแหล่งจ่ายพลังงานและโหลดเป็นรายๆ ไป ซึ่งโดยโครงสร้างแล้ว ดีซี/ดีซี คอนเวอร์เตอร์ จะต้องเป็น บั๊ก/บู๊ส คอนเวอร์เตอร์ โดยค่า D ต่างๆ ที่สัมพันธ์กับความเข้มแสงอาทิตย์จะนำไปใช้เพื่อบังคับและควบคุมการทำงานของอุปกรณ์สวิตชิงภายในคอนเวอร์เตอร์ ในส่วนที่สามได้แสดงรายละเอียดการลดกำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ต่อควมปั้มน้ำให้ต่ำที่สุด เพื่อหาค่าอัตรากระแสขั้วมอเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด เพื่อก่อให้เกิดประโยชน์ในด้านการใช้พลังงานที่มีอย่างคุ้มค่าที่สุด

บทที่ 4

การออกแบบระบบพลังงานผสมผสาน

4.1 บทนำ

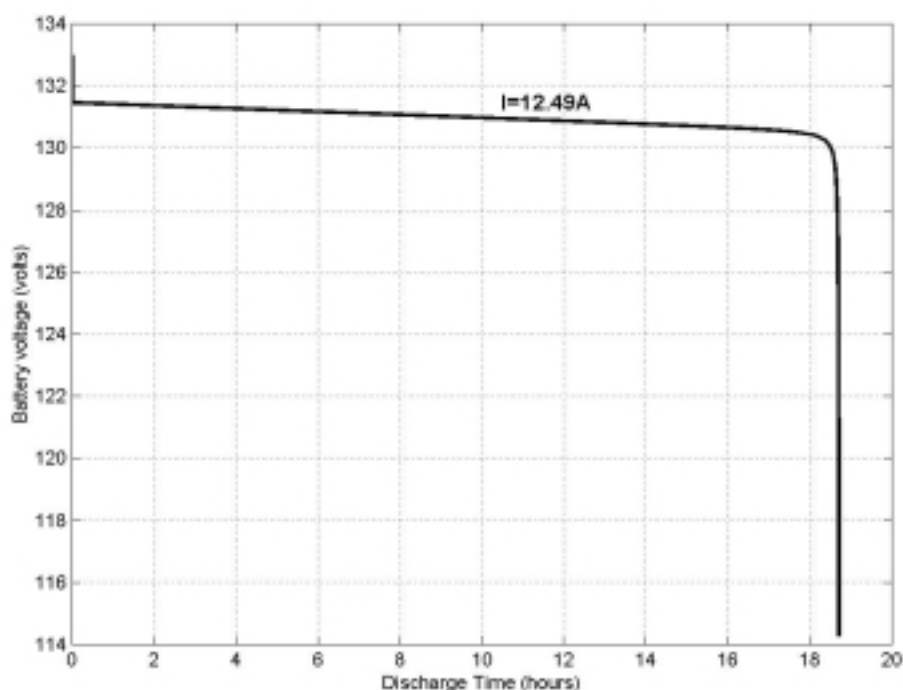
ตัวแปรสำคัญที่เป็นตัวกำหนดการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในระบบพลังงานผสมผสาน ก็คือราคาของแผงโซลาร์เซลล์และแบตเตอรี่ ดังนั้นการออกแบบจำนวนของแผงโซลาร์เซลล์และแบตเตอรี่ที่เหมาะสมย่อมนำไปสู่การติดตั้งระบบด้วยต้นทุนต่ำ ดังนั้นในบทที่ 4 นี้ จึงอธิบายถึงกระบวนการในการคำนวณหาจำนวนของแผงโซลาร์เซลล์และแบตเตอรี่ที่ต่ออนุกรมหรือขนานกันอย่างพอเหมาะ เพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้าเพียงพอต่อการใช้งานในระบบพลังงานผสมผสานอย่างต่อเนื่องตลอดทั้งวันอย่างอิสระ

หลักในการออกแบบระบบพลังงานผสมผสานก็คือ จะต้องนำแผงโซลาร์เซลล์ แบตเตอรี่และมอเตอร์ต่อควบปั้มน้ำ พร้อมทั้งค่าความเข้มแสงอาทิตย์ตลอดทั้งวัน มาพิจารณาร่วมกันทั้งระบบ โดยค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของอุปกรณ์ในระบบจะยังคงเป็นค่าเดิมเหมือนกับบทที่ผ่านๆ มา อีกทั้งแผงโซลาร์เซลล์ทุกแผงและแบตเตอรี่ทุกลูก จะต้องมีลักษณะสมบัติเหมือนกันทุกประการซึ่งหลักในการออกแบบจะต้องมีจำนวนของแผงโซลาร์เซลล์เพียงพอที่จะผลิตพลังงานไฟฟ้าเพื่อนำไปชาร์จแบตเตอรี่ พร้อมทั้งจ่ายให้แก่มอเตอร์ภายในช่วงระยะเวลาที่มีแสงทั้งหมด 8 ชั่วโมง (08.00-16.00 น.) ส่วนช่วงระยะเวลาที่ไม่มีแสงที่แผงโซลาร์เซลล์ไม่สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ ก็เป็นหน้าที่ของแบตเตอรี่ที่ต้องดิสชาร์จพลังงานไฟฟ้าให้แก่มอเตอร์ โดยแบตเตอรี่จะต้องมีพลังงานเพียงพอที่จะดิสชาร์จได้ตลอดช่วงระยะเวลาที่ไม่มีแสงนี้

4.2 การคำนวณหาจำนวนของแบตเตอรี่ที่เหมาะสม

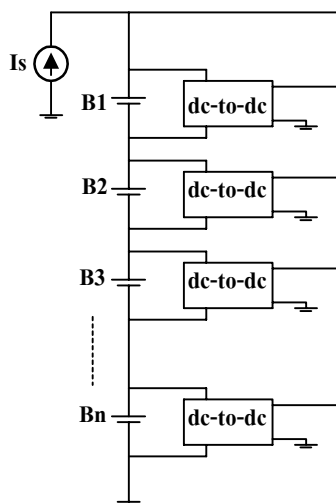
ในการคำนวณหาจำนวนของแบตเตอรี่ เนื่องจากเราทราบค่าพิกัดแรงดันของมอเตอร์แล้วอันดับแรกจึงทำการคำนวณหาจำนวนลูกของแบตเตอรี่ที่อนุกรมในแต่ละชุดเสียก่อน โดยค่าแรงดันที่ได้จากการออกแบบ จะต้องมีความเพียงพอที่จะใช้ในสภาวะการดิสชาร์จให้แก่มอเตอร์ขนาดพิกัด 110 V ซึ่งจากการพิจารณาจะได้จำนวนแบตเตอรี่ที่อนุกรมต่อชุดเท่ากับ 10 ลูก เพราะทำให้แบตเตอรี่มีแรงดันปกติกลายเป็น 120 V ซึ่งมีความเพียงพอในการดิสชาร์จให้แก่มอเตอร์

จากนั้นทำการคำนวณหาจำนวนชุดที่ต่อขนานกันของแบตเตอรี่ เนื่องจากเรทราบค่ากระแสของมอเตอร์เมื่อพิจารณาการลดค่ากำลังงานสูญเสียในมอเตอร์ให้ต่ำสุดเท่ากับ 12.49 A แล้วจากบทที่ 3 ที่ผ่านมา ซึ่งการออกแบบจำนวนชุดที่ต่อขนานกัน จะต้องพิจารณาถึงระยะเวลาที่ใช้ในการดิสชาร์จให้แก่มอเตอร์ โดยแบตเตอรี่จะต้องมีพลังงานเพียงพอที่จะดิสชาร์จได้ตลอดช่วงระยะเวลาที่ไม่มีแสง ซึ่งในหนึ่งวันกำหนดให้มีแสง 8 ชั่วโมง ดังนั้นแบตเตอรี่จะต้องมีพลังงานเพียงพอที่จะดิสชาร์จได้ภายในช่วงระยะเวลาที่ไม่มีแสง 16 ชั่วโมง ซึ่งจากการคำนวณด้วยโปรแกรมโดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในบทที่ 2 จะได้จำนวนชุดที่ต่อขนานกันของแบตเตอรี่มีค่าเท่ากับ 5 ชุด ซึ่งมีความเพียงพอในการดิสชาร์จให้แก่มอเตอร์เกินกว่าระยะเวลา 16 ชั่วโมงที่ไม่มีแสง ดังแสดงด้วยภาพที่ 4.1 ดังนั้นจากการออกแบบจำนวนของแบตเตอรี่ที่เหมาะสมจึงได้ว่า แบตเตอรี่มีจำนวนทั้งสิ้น 50 ลูก ต่อเป็นชุดขนานกัน 5 ชุด ซึ่งแต่ละชุดมีแบตเตอรี่ 10 ลูก ต่ออนุกรมกันอยู่



ภาพที่ 4.1 การดิสชาร์จพลังงานของแบตเตอรี่ให้แก่มอเตอร์

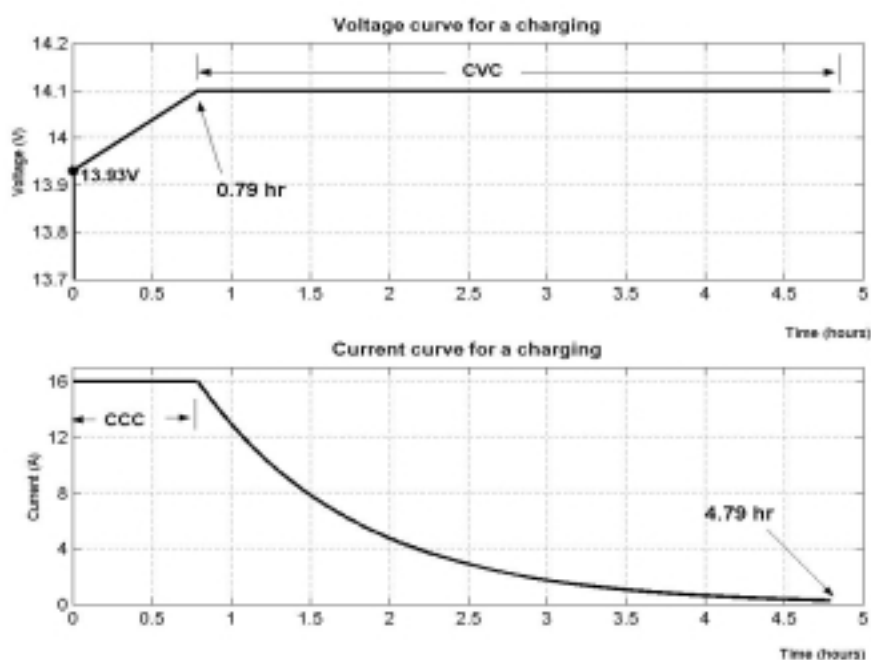
แบตเตอรี่ทุกลูกจะมีอุปกรณ์ควบคุมการประจุแบตเตอรี่ (charge equalizer) สำหรับคงค่าแรงดันในขณะชาร์จให้เท่ากันทุกๆ ลูก ซึ่งงานวิจัยของ (Kutkut, and Divan, 1996) ได้เลือกใช้ อุปกรณ์ควบคุมการประจุแบตเตอรี่แบบ ดีซี/ดีซี คอนเวอร์เตอร์ ซึ่งเป็นแบบที่เหมาะสมสำหรับระบบที่มีอัตราการผลิตกระแสค่าสูงๆ เพื่อแบตเตอรี่จะได้ชาร์จเต็มได้เร็วขึ้น และยังช่วยยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ด้วย ดังแสดงด้วยภาพที่ 4.2



ภาพที่ 4.2 อุปกรณ์ควบคุมการประจุแบตเตอรี่

ลักษณะการชาร์จแบตเตอรี่ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ อ้างอิงจากบทความของ (Bandara, Ivanov, and Gishin, 1999) ซึ่งเป็นวิธีการชาร์จที่เหมาะสมและเป็นที่ยอมรับกันอย่างแพร่หลาย โดยแบ่งการชาร์จออกเป็น 2 ช่วง ได้แก่ CCC และ CVC ช่วง CCC เป็นการชาร์จด้วยอัตรากระแสสูงคงที่ค่าหนึ่ง ในช่วง CCC ค่าแรงดันแบตเตอรี่จะเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วจนกระทั่งถึงค่าแรงดันสูงสุด จากนั้นก็ดำเนินการชาร์จในช่วง CVC ต่อทันที ก่อนที่จะเกิดแรงดันเกินขึ้นในแบตเตอรี่ ในช่วง CVC ต้องทำการลดปริมาณกระแสในการชาร์จแบตเตอรี่ลงแบบเอ็กซ์โปเนนเชียลจนเกือบเป็นศูนย์เพื่อรักษาแรงดันในช่วง CVC ให้คงที่ โดยให้คงที่แรงดันในช่วง CVC อยู่ที่ระดับสูงสุดไว้ประมาณ 4 ชั่วโมง (Casacca, Capobianco, and Salameh, 1996) จึงจะทำให้แบตเตอรี่ได้รับการชาร์จอย่างสมบูรณ์

แบตเตอรี่ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ จะเริ่มชาร์จไม่พร้อมกัน โดยจะเริ่มชาร์จเป็นลำดับทีละชุดตามค่าความเข้มแสงที่พอเพียงต่อแบตเตอรี่ชุดนั้นๆ การคำนวณหาอัตรากระแสในการชาร์จแบตเตอรี่ต่อลูกในแต่ละชุดที่พอเหมาะนั้น จะต้องคำนึงถึงเวลาที่แบตเตอรี่ใช้ในการชาร์จให้สอดคล้องกับช่วงเวลาที่มิแสงเป็นหลัก โดยการชาร์จแบตเตอรี่ให้เต็มทั้ง 5 ชุด จะต้องใช้เวลาทั้งหมดอยู่ในช่วงที่มีแสง 8 ชั่วโมง ซึ่งจากการคำนวณด้วยโปรแกรม จะได้ค่าอัตรากระแสในการชาร์จแบตเตอรี่ต่อลูกในแต่ละชุดของช่วง CCC ที่พอเหมาะเท่ากับ 16 A ดังแสดงด้วยภาพที่ 4.3 โดยถ้าต่ำกว่าค่านี้ จะทำให้เวลาที่ชาร์จเต็มไม่เหมาะสมกับช่วงระยะเวลาที่มีแสงอย่างจำกัด แต่ถ้าสูงกว่าค่านี้ จะเกิดแรงดันเกินขึ้นในแบตเตอรี่ ทำให้อายุการใช้งานสั้นลง



ภาพที่ 4.3 ลักษณะสมบัติของแบตเตอรี่ขณะชาร์จ

จากภาพที่ 4.3 จะสังเกตเห็นว่า การชาร์จแบตเตอรี่ต่อลูกในแต่ละชุดด้วยอัตราการชาร์จ 16 A ในช่วง CCC และอัตราการชาร์จ $16 \cdot \exp(-t)$ ในช่วง CVC แบตเตอรี่หนึ่งชุดจะใช้เวลาในการชาร์จทั้งหมด 4.79 ชั่วโมง โดยใช้เวลาในการชาร์จช่วง CCC เท่ากับ 0.79 ชั่วโมง และใช้เวลาในการชาร์จช่วง CVC เท่ากับ 4 ชั่วโมง และเมื่อพิจารณาระยะเวลาที่ใช้ในการชาร์จทั้งหมด 4.79 ชั่วโมง ต่อแบตเตอรี่หนึ่งชุด ประกอบกับการพิจารณาจำนวนชุดทั้งหมดของแบตเตอรี่ที่มีทั้งหมด 5 ชุด และแต่ละชุดเริ่มชาร์จไม่พร้อมกัน โดยจะเริ่มชาร์จเป็นลำดับทีละชุดตามปริมาณพลังงานที่แผงฟิวผลิตได้ ซึ่งก็จะมีเหมาะสมกับระยะเวลาที่มีแสงทั้งหมด 8 ชั่วโมงเช่นกัน

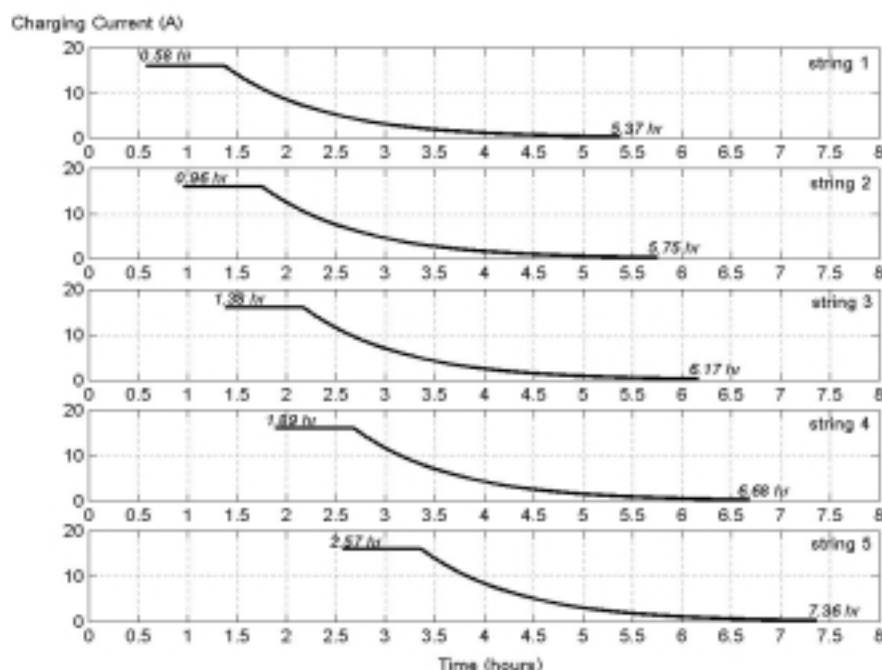
4.3 การคำนวณหาจำนวนของแผงฟิวที่เหมาะสม

การหาจำนวนมอดูลของแผงฟิว ต้องหาจำนวนมอดูลที่อนุกรมต่อแผงเป็นอันดับแรกเสียก่อน โดยค่าแรงดันของแผงฟิว ต้องมีความเพียงพอสำหรับแบตเตอรี่ขนาดพิกัด 120 V และเพียงพอสำหรับมอเตอร์ 110 V ซึ่งจากการพิจารณาจะได้จำนวนมอดูลของแผงฟิวที่อนุกรมต่อแผงเท่ากับ 8 เพราะทำให้แผงฟิวมีแรงดันพิกัดกลายเป็น 120 V ซึ่งมีความเพียงพอที่จะจ่ายให้แก่แบตเตอรี่และมอเตอร์ จากนั้นจึงคำนวณหาจำนวนมอดูลที่ต่อขนานกันของแผงฟิว โดยต้องมีกระแสเพียงพอที่จะจ่ายให้มอเตอร์ 12.49 A และชาร์จแบตเตอรี่ทั้งหมด 50 ลูกให้เต็มภายในระยะเวลา 8 ชั่วโมงที่มีแสง

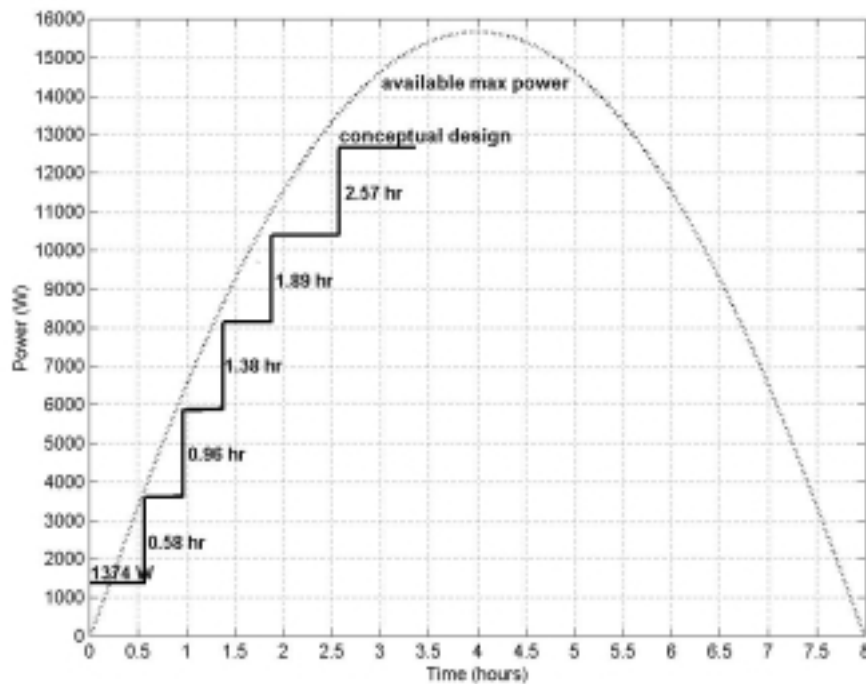
การหาจำนวนมอดูลที่ต่อขนานกันของแผงฟิว จะพิจารณาถึงค่ากระแสที่แผงฟิวผลิตได้ ว่ามีเพียงพอหรือไม่ที่จะชาร์จแบตเตอรี่ให้เต็มทั้ง 5 ชุด ภายในระยะเวลาที่มีแสง 8 ชั่วโมง เมื่อหักส่วนที่จ่ายให้มอเตอร์ออกแล้ว 12.49 A ซึ่งจากข้างต้น การชาร์จแบตเตอรี่แต่ละชุดใช้กระแสช่วง CCC

เท่ากับ 16 A ดังนั้นแบตเตอรี่ทั้ง 5 ชุด จึงใช้กระแสช่วง CCC ทั้งหมดเท่ากับ 80 A และค่าความเข้มแสงอาทิตย์ก็มีลักษณะเป็นรูปพาราโบลาจะข้งคว่ำ ดังนั้นแผงพีวีจะต้องผลิตกระแสเมื่อหักส่วนที่จ่ายให้มอเตอร์ออกแล้วให้มีค่าน้อยเท่ากับ 80 A ก่อนถึงจุดที่ความเข้มแสงมีค่าสูงสุดที่จุดยอดของเส้นโค้งจะข้งคว่ำเป็นเวลาอย่างน้อยเท่ากับช่วง CCC นั่นเอง ทั้งนี้เพราะวันหนึ่งมีแสงประมาณ 8 ชั่วโมง ดังนั้นความเข้มสูงสุดที่จุดยอดของระฆังจะอยู่ที่เวลานับตั้งแต่เริ่มมีแสงเท่ากับ 4 ชั่วโมง โดยใน 4 ชั่วโมงแรกจะมีค่าความเข้มแสงเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ส่วนใน 4 ชั่วโมงหลังจะมีค่าลดน้อยลงเรื่อยๆ ซึ่งเวลา 4 ชั่วโมงหลังนี้เองที่แบตเตอรี่ชุดที่ 5 ใช้ในการชาร์จช่วง CVC เนื่องจากในช่วง CVC อัตรากระแสในการชาร์จนั้นลดน้อยลงสอดคล้องกับความเข้มแสงอาทิตย์เช่นกัน ส่วนเวลาช่วงท้ายของ 4 ชั่วโมงแรกนั้น แบตเตอรี่ชุดที่ 5 จะใช้ในการชาร์จช่วง CCC เนื่องจากในช่วง CCC แบตเตอรี่ชุดที่ 5 ยังต้องการกระแสในการชาร์จคงที่อยู่ ซึ่งค่าความเข้มแสงในช่วงท้ายของ 4 ชั่วโมงแรกก็เพียงพออยู่แล้ว ทั้งนี้เพราะความเข้มแสงใน 4 ชั่วโมงแรกมีค่าเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ นั่นเอง

จากการคำนวณด้วยโปรแกรมจะได้จำนวนมอดูลที่ต่อขนานกันของแผงพีวีมีค่าเท่ากับ 25 ดังนั้นจากการออกแบบจำนวนของแผงพีวีที่เหมาะสมจึงได้ว่า แผงพีวีมีจำนวนทั้งสิ้น 200 มอดูล ต่อเป็นแผงขนานกัน 25 แผง ซึ่งแต่ละแผงมี 8 มอดูลต่ออนุกรมกันอยู่ โดยกระแสที่ผลิตได้จากแผงพีวี 200 มอดูล เมื่อหักส่วนที่จ่ายให้มอเตอร์ออกแล้ว จะมีความเพียงพอในการชาร์จแบตเตอรี่ทั้ง 5 ชุด ดังแสดงด้วยภาพที่ 4.4 ส่วนกำลังงานที่แผงพีวีผลิตได้ภายในระยะเวลาที่มีแสง 8 ชั่วโมง เทียบกับกำลังงานที่มอเตอร์และแบตเตอรี่ต้องใช้ที่ได้จากการออกแบบ แสดงได้ด้วยภาพที่ 4.5



ภาพที่ 4.4 คุณลักษณะของกระแสในการชาร์จแบตเตอรี่แต่ละชุด



ภาพที่ 4.5 การเปรียบเทียบระหว่างกำลังงานที่แผงพีวีผลิตได้
กับกำลังงานที่มอเตอร์และแบตเตอรี่ต้องใช้

จากภาพที่ 4.4 กระจายจากแผงพีวีที่นำมาชาร์จแบตเตอรี่ได้หักส่วนที่จ่ายให้มอเตอร์ออกแล้ว 12.49 A การชาร์จทำได้เสร็จสิ้นภายในระยะเวลาที่มีแสง 8 ชั่วโมง โดยการชาร์จแบตเตอรี่ชุดที่ 1, 2, 3, 4 และ 5 จะต้องรอให้กระแสมีปริมาณถึง 16, 32, 48, 64 และ 80 A ตามลำดับก่อน แบตเตอรี่ชุดที่ 1, 2, 3, 4 และ 5 จะเริ่มชาร์จที่เวลา 0.58, 0.96, 1.38, 1.89 และ 2.57 ชั่วโมงตามลำดับ และสิ้นสุดการชาร์จที่เวลา 5.37, 5.75, 6.17, 6.68 และ 7.36 ชั่วโมงตามลำดับ (หมายเหตุ: เวลาที่ 0 หมายถึง 08.00 น. และเวลาที่ 8 ชั่วโมง หมายถึง 16.00 น.) ส่วนภาพที่ 4.5 จะสังเกตเห็นว่า กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงพีวีมีค่ามากเกินไปในการชาร์จแบตเตอรี่และจ่ายให้มอเตอร์ตลอดทั้งช่วงเวลาที่ มีแสง โดยจะต้องนำไปจ่ายให้มอเตอร์ด้วยปริมาณ 1374 W เป็นฐานทุกกรณีก่อนที่จะชาร์จแบตเตอรี่

4.4 สรุป

บทที่ 4 ที่ผ่านมามีอธิบายถึงกระบวนการในการออกแบบจำนวนของแผงพีวีและแบตเตอรี่ที่พอเหมาะของระบบพลังงานผสมผสาน รวมทั้งวิธีการในการชาร์จแบตเตอรี่ที่เหมาะสม โดยมีวัตถุประสงค์ในการประหยัดพลังงานและลดต้นทุนที่ใช้ในการติดตั้งระบบ ซึ่งในการออกแบบจะต้องนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และคุณลักษณะต่างๆ ของอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบ

พลังงานผสมผสานมาพิจารณาประกอบไปด้วย จากการออกแบบระบบสามารถสรุปได้ว่า ระบบพลังงานผสมผสานในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ จะมีกำลังไฟฟ้าเพียงพอต่อการใช้งานตลอดทั้ง 24 ชั่วโมงอย่างอิสระได้ เมื่อประกอบไปด้วยแผงพีวีจำนวนทั้งสิ้น 200 มอดูล ต่อเป็นแผงขนานกัน 25 แผง ซึ่งแต่ละแผงมี 8 มอดูลต่ออนุกรมกันอยู่ และแบตเตอรี่จำนวนทั้งสิ้น 50 ลูก ต่อเป็นชุดขนานกัน 5 ชุด ซึ่งแต่ละชุดมีแบตเตอรี่ 10 ลูก ต่ออนุกรมกันอยู่

บทที่ 5

พลวัตทางพลังงานของระบบพลังงานผสมผสาน

5.1 บทนำ

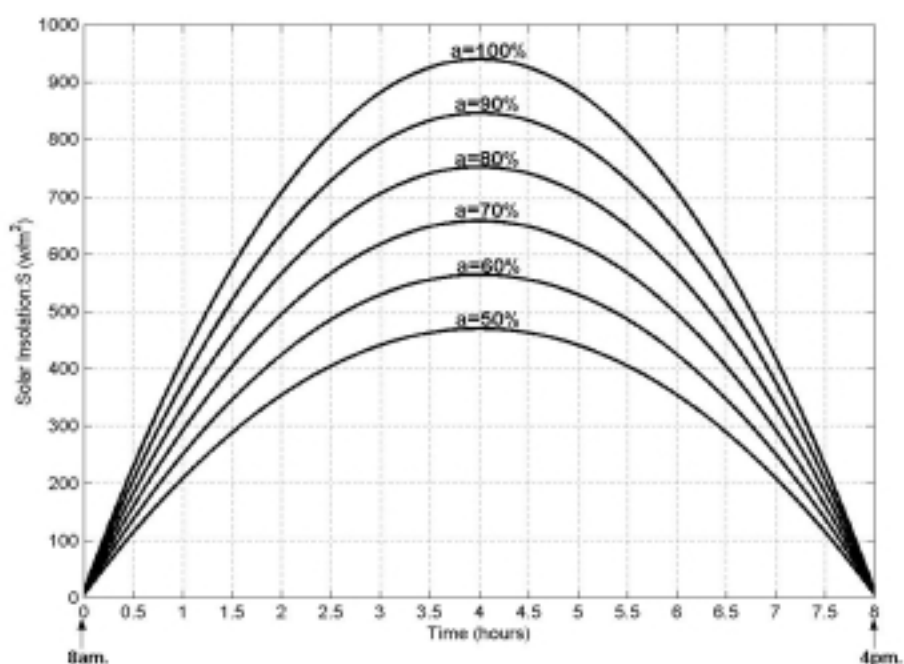
ผลการดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์ในด้านการทำออปติไมเซชันการใช้พลังงานในระบบพลังงานผสมผสานที่ผ่านมาในบทที่ 3 นั้น อยู่ในส่วนที่สามารถดำเนินการตามแบบแผนโดยอาศัยวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขได้ ซึ่งงานวิจัยที่ผ่านมาได้พิจารณาการถ่ายโอนกำลังงานสูงสุดระหว่างแผงฟิโรว์ร่วมกับส่วนประกอบต่างๆ ในระบบ และได้พิจารณาถึงการลดค่ากำลังงานสูญเสียในมอเตอร์ให้เหลือน้อยที่สุด เนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นของส่วนประกอบต่างๆ ในระบบ รวมถึงถึงความเข้มแสงอาทิตย์ การจะทำความเข้าใจให้ได้ถึงพลวัตของระบบเช่นนี้ คงต้องอาศัยการจำลองผลระบบด้วยคอมพิวเตอร์บนรากฐานของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ถูกต้อง การมีโปรแกรมจำลองผลจึงมีความจำเป็นและมีประโยชน์อย่างยิ่งต่อการศึกษาพลวัตทางพลังงานของระบบ ดังนั้นในบทที่ 5 นี้ จึงได้อธิบายถึงโครงสร้างของโปรแกรมจำลองผลระบบพลังงานผสมผสาน ตลอดจนแสดงผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้งานโปรแกรมซึ่งพัฒนาขึ้นด้วยภาษา C โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ประโยชน์ในการศึกษาและออกแบบชุดควบคุมเพื่อประหยัดพลังงาน และการวิเคราะห์ถึงพลวัตทางพลังงานในระบบ

5.2 โครงสร้างและการพัฒนาโปรแกรมจำลองผล

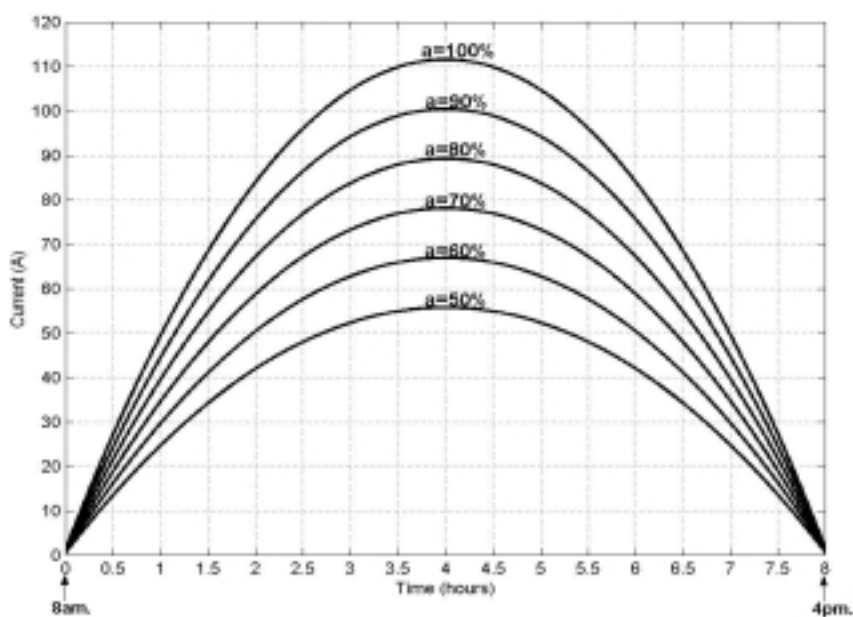
จากคุณลักษณะของกระแสในการชาร์จแบตเตอรี่แต่ละชุดในบทที่ 4 ที่ผ่านมา ในการเริ่มชาร์จแบตเตอรี่ชุดที่ 1, 2, 3, 4 และ 5 นั้น จะต้องรอค่ากระแสที่เหลือจ่ายให้มอเตอร์เรียบร้อยแล้วมีปริมาณถึง 16, 32, 48, 64 และ 80 A ตามลำดับก่อนทุกครั้ง โดยในบทที่ที่ผ่านมา จะใช้ค่ากระแสคงที่ในการชาร์จแบตเตอรี่เป็นปัจจัยหลักในการพิจารณาออกแบบ ไม่ได้คำนึงถึงช่วง CVC ของแบตเตอรี่แต่ละชุดมาร่วมพิจารณาประกอบการชาร์จ จึงเป็นการจัดให้มีส่วนของพลังงานจากแผงฟิโรว์มากเกินไป แต่เมื่อนำช่วง CVC ซึ่งอัตรากระแสในการชาร์จได้ลดลงแบบเอ็กซ์โปเนนเชียลมาพิจารณาประกอบการชาร์จด้วยแล้ว จึงไม่มีความจำเป็นที่แผงฟิโรว์ต้องจ่ายปริมาณกระแสจำนวน 16 A ให้แก่แบตเตอรี่ทุกๆ ชุดตลอดทั้งช่วง CCC และ CVC ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์ในบทนี้ จึงได้ทำการจำลองผลระบบด้วยคอมพิวเตอร์เมื่อมีการปรับปรุงและควบคุมการชาร์จ

ให้ดำเนินไปอย่างสอดคล้องกับลักษณะสมบัติของแบตเตอรี่ตามการชาร์จจริง และเพื่อทำความเข้าใจถึงพฤติกรรมอันไม่เป็นเชิงเส้นของระบบพลังงานผสมผสานอย่างลึกซึ้งและถ่องแท้มากยิ่งขึ้น

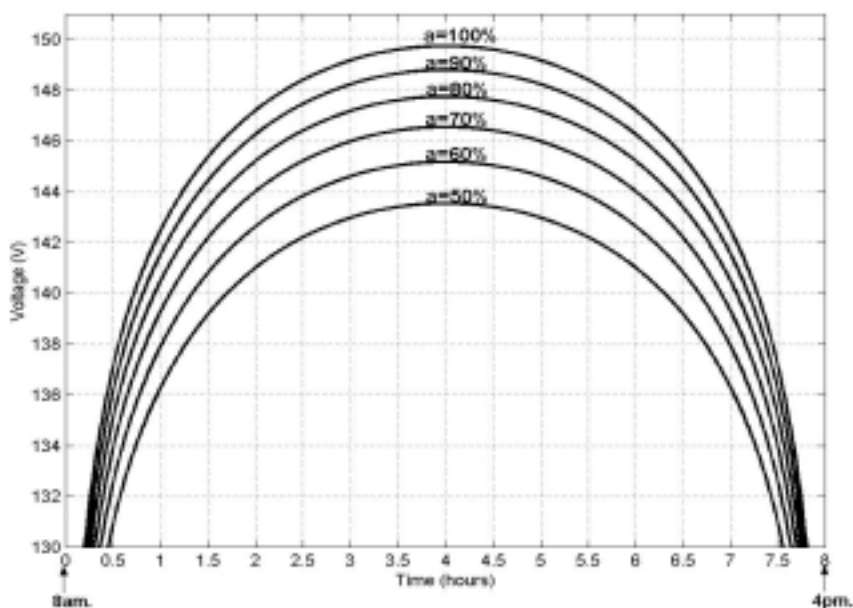
ในการศึกษานี้ จะพิจารณาความเข้มแสงอาทิตย์มีลักษณะเป็นรูปพาราโบลาระฆังคว่ำคงที่ตลอดทั้งวัน (08.00 น. – 16.00 น.) ซึ่งเป็นลักษณะความเข้มแสงที่สอดคล้องกับภูมิภาคเขตร้อนอย่างเช่นประเทศไทย และในรอบปีค่าความเข้มแสงอาทิตย์ในประเทศไทยก็มีลักษณะเปลี่ยนแปลงไปจากรูปพาราโบลาระฆังคว่ำไม่มากนัก จากข้อมูลค่าเฉลี่ยความเข้มแสงอาทิตย์ทั่วประเทศจากทุกพื้นที่ที่ปรากฏในบทที่ 2 ของงานวิจัยนี้ มีค่าเท่ากับ $5 \text{ kw.hr/m}^2/\text{day}$ ซึ่งเราอาจพิจารณาได้ว่าเป็น 100% ของวันที่มีปริมาณแสงอาทิตย์แรงที่สุดหรืออาจเรียกว่าวันฟ้าเปิด (sunny day) ซึ่งหมายถึงไม่มีเมฆปกคลุมแสงอาทิตย์เลย ขณะที่ 50% ของวันฟ้าเปิด ถือว่าเป็นวันที่มีปริมาณแสงอาทิตย์อ่อนที่สุดที่เป็นไปได้ที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ เพราะปริมาณแสงอาทิตย์ที่ต่ำกว่า 50% ของวันฟ้าเปิด อาจเกิดขึ้นได้น้อยมากเฉพาะในกรณีที่มีพายุฝนเท่านั้น ค่าความเข้มแสงอาทิตย์ในหนึ่งวันคิดเป็นร้อยละของวันที่ฟ้าเปิด (หรือแทนได้ด้วย a) จาก 100% จนถึง 50% โดยลดลงทีละ 10% ที่ใช้ในการศึกษาพลวัตทางพลังงานของระบบนี้ สามารถแสดงได้ด้วยภาพที่ 5.1 และค่ากระแสและแรงดันที่ทำให้เกิดกำลังงานสูงสุดที่สอดคล้องกับค่าความเข้มแสงอาทิตย์ที่คิดเป็นร้อยละของวันที่ฟ้าเปิด สามารถแสดงได้ด้วยภาพที่ 5.2 และ 5.3 ตามลำดับ (หมายเหตุ: เวลาที่ 0 หมายถึง 08.00 น. และเวลาที่ 8 ชั่วโมง หมายถึง 16.00 น.)



ภาพที่ 5.1 ค่าความเข้มแสงอาทิตย์ในหนึ่งวัน แสดงเป็นร้อยละของวันที่ฟ้าเปิด (100% หมายถึงฟ้าเปิด)

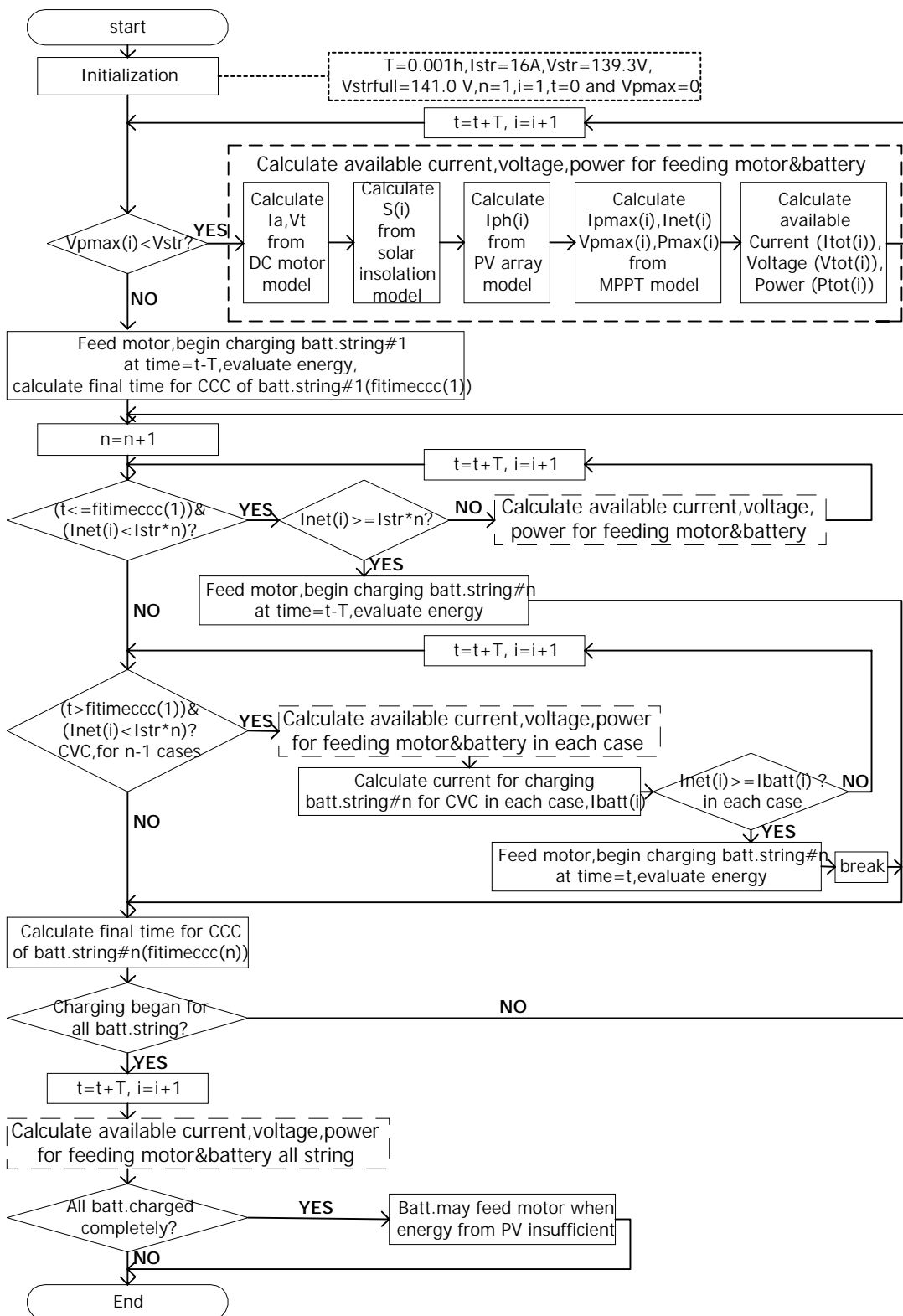


ภาพที่ 5.2 ค่ากระแสที่ทำให้เกิดกำลังงานสูงสุดตลอดทั้งวันที่มีแสง
แสดงเป็นร้อยละของวันที่ฟ้าเปิด



ภาพที่ 5.3 ค่าแรงดันที่ทำให้เกิดกำลังงานสูงสุดตลอดทั้งวันที่มีแสง
แสดงเป็นร้อยละของวันที่ฟ้าเปิด

โครงสร้างหลักของโปรแกรมจำลองผลเพื่อศึกษาถึงพลวัตทางพลังงานของระบบ ประกอบด้วย แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุปกรณ์ต่างๆ ที่รวมเข้ากันไว้เป็นระบบ และ อัลกอริทึมในการชาร์จแบตเตอรี่ในแต่ละจุดที่สอดคล้องกับลักษณะสมบัติของแบตเตอรี่ ตามค่าความเข้มแสงอาทิตย์ที่เปลี่ยนแปลงไป สามารถแสดงเป็นแผนภูมิได้ดังภาพที่ 5.4



ภาพที่ 5.4 แผนภูมิแสดง โครงสร้างของโปรแกรมจำลองผลระบบพลังงานผสมผสาน

จากแผนภูมิในภาพที่ 5.4 สามารถอธิบายโครงสร้างของโปรแกรมจำลองผลระบบได้ดังนี้ เมื่อเริ่มต้นที่เวลาเป็นศูนย์ ($t = 0$) ทำการกำหนดค่าเริ่มต้นของตัวแปรต่างๆ อาทิเช่น คาบเวลาการสุ่มสัญญาณ (sampling period : T) ซึ่งโปรแกรมจำลองผลระบบพลังงานผสมผสานในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มีค่า T เท่ากับ 0.001 ชั่วโมง (3.6 วินาที) ค่าแรงดันที่ทำให้เกิดกำลังงานสูงสุดมีค่าเท่ากับศูนย์ ($V_{Pmax} = 0$) และตัวดัชนี $i=1$ เป็นต้น

จากนั้นทำการทดสอบ V_{Pmax} แต่ละดัชนี i ($V_{Pmax}(i)$) ว่ามีความเพียงพอในการเริ่มชาร์จแบตเตอรี่ชุดที่ 1 หรือไม่ ซึ่งกระแสที่ใช้ในการเริ่มชาร์จแบตเตอรี่ชุดที่ 1 ทุกๆ ค่าเฉลี่ยความเข้มแสงอาทิตย์ที่คิดเป็นร้อยละของวันที่ฟ้าเปิด จะมีความเพียงพอก่อนหน้าแรงดันอยู่แล้ว ดังนั้นการเริ่มชาร์จแบตเตอรี่ในชุดที่ 1 จึงเน้นที่ความเพียงพอของแรงดันเป็นหลัก แต่ในการพิจารณาการเริ่มชาร์จแบตเตอรี่ในชุดที่ 2 จนถึงชุดสุดท้าย แรงดันที่ใช้ในการเริ่มชาร์จแบตเตอรี่จะมีความเพียงพอก่อนหน้ากระแสอยู่ทุกครั้ง ดังนั้นการเริ่มชาร์จแบตเตอรี่ในชุดที่ 2 จนถึงชุดสุดท้าย จึงเน้นที่ความเพียงพอของกระแสเป็นหลัก ซึ่งความซับซ้อนในการพิจารณาเช่นนี้เป็นผลเนื่องมาจาก ความไม่เชิงเส้นของกระแสและแรงดันที่แผงพีวีผลิตได้ดังแสดงด้วยภาพที่ 5.2 และ 5.3 ที่ผ่านมาในข้างต้น

ในขั้นตอนการทดสอบความเพียงพอของกระแสและแรงดันในการเริ่มชาร์จแบตเตอรี่ทุกชุดนั้น จะมีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุปกรณ์ต่างๆ มาพิจารณาเพื่อใช้เป็นเครื่องมือช่วยในการตัดสินใจร่วมอยู่ด้วย อาทิเช่น แบบจำลองของมอเตอร์ แบบจำลองความเข้มแสงอาทิตย์ และแบบจำลองของแผงพีวี เป็นต้น

การเริ่มชาร์จแบตเตอรี่ชุดที่ 2 จนถึงชุดสุดท้ายนั้น จะเน้นที่ความเพียงพอของกระแสเป็นหลัก โดยจะนำกระแสที่แผงพีวีผลิตได้เมื่อหักส่วนที่จ่ายให้มอเตอร์ออกแล้วแต่ละดัชนี i ($I_{net}(i)$) มาร่วมคิดพิจารณาด้วย ซึ่งแบตเตอรี่ทุกชุดในขั้นนี้ จะมีอัลกอริทึมในการชาร์จที่คล้ายกัน โดยเวลาในการเริ่มชาร์จ จะมีความเป็นไปได้อยู่ 2 ช่วงใหญ่ๆ โดยช่วงที่ 1 เริ่มชาร์จในช่วงที่แบตเตอรี่ก่อนหน้าชุดที่กำลังพิจารณายังชาร์จอยู่ในช่วง CCC ครบหมดทุกชุด และช่วงที่ 2 เริ่มชาร์จในช่วงที่แบตเตอรี่ก่อนหน้าชุดที่กำลังพิจารณาชาร์จอยู่ในช่วง CVC บ้างแล้วบางชุดหรือทุกชุด การชาร์จแบตเตอรี่ในช่วงที่ 1 จะมีอัลกอริทึมเหมือนกับการชาร์จแบตเตอรี่ชุดที่ 1 ในข้างต้น แต่จะเน้นที่ความเพียงพอของกระแสเป็นหลัก ส่วนการชาร์จแบตเตอรี่ในช่วงที่ 2 จะมีช่วงเวลาที่เป็นไปได้ในการเริ่มชาร์จแบ่งออกเป็นช่วงย่อยๆ ละเอียดลงไปอีก โดยจำนวนช่วงเวลาย่อยๆ นี้ จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามจำนวนชุดของแบตเตอรี่ที่มากขึ้น ซึ่งในแต่ละช่วงเวลาย่อยๆ ค่ากระแสที่แบตเตอรี่ต้องการใช้ในการชาร์จแต่ละดัชนี i ($I_{batt}(i)$) ก็จะมีค่าลดลงแบบเอ็กซ์โปเนนเชียลที่แตกต่างกันไปในแต่ละ

ช่วงเวลาด้วย ซึ่งอัลกอริทึมในการพิจารณาจะใช้หลักการทำนองเดียวกับช่วงที่ 1 โดยจะต้องคำนึงถึง I_{batt(i)} เป็นหลัก

จากนั้นทำการพิจารณาว่าแบตเตอรี่ทุกชุดชาร์จเสร็จสิ้นสมบูรณ์หรือไม่ โดยถ้าแบตเตอรี่ทุกชุดชาร์จเสร็จสิ้นสมบูรณ์ ให้ดำเนินการดิสชาร์จแบตเตอรี่ให้แก่มอเตอร์ ถ้าพลังงานจากแผงพีวีไม่มีความเพียงพอที่จะจ่ายให้มอเตอร์ได้อีก

ส่วนโปรแกรมจำลองผลระบบพลังงานผสมผสานที่พัฒนาขึ้นด้วยภาษา C (รายละเอียดของโปรแกรมแสดงไว้ในภาคผนวก ก.) มีคำอธิบายโปรแกรมโดยย่อดังนี้ โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ได้แก่

- วินิจฉัยค่าพลังงานที่แผงพีวีผลิตได้ว่ามีความเพียงพอที่จะจ่ายให้มอเตอร์และชาร์จแบตเตอรี่ชุดใดได้บ้าง
- บันทึกลักษณะสมบัติการใช้พลังงานของมอเตอร์และแบตเตอรี่ เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ถึงพลวัตทางด้านพลังงานของระบบ
- พิจารณาว่าแบตเตอรี่ชุดใดชาร์จเสร็จสิ้นสมบูรณ์บ้าง และอาจต้องปลดแบตเตอรี่ชุดใดบ้างเมื่อพลังงานจากแผงพีวีไม่เพียงพอ
- ดำเนินการดิสชาร์จแบตเตอรี่ให้แก่มอเตอร์ ถ้าพลังงานจากแผงพีวีไม่มีความเพียงพอที่จะจ่ายให้มอเตอร์ได้อีก

ตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในโปรแกรม ได้แก่

n, i, j, m, = ดัชนีการนับ

repeat, count

T = คาบเวลาการสุ่มสัญญาณ (h)

I_a, V_t = ค่ากระแส (A) และแรงดัน (V) ที่ป้อนให้แก่มอเตอร์ ตามลำดับ

I_{str}, V_{str} = ค่ากระแส (A) และแรงดัน (V) ที่ใช้ในการเริ่มชาร์จแบตเตอรี่ต่อชุดในช่วง CCC ตามลำดับ

V_{strfull} = ค่าแรงดันที่แบตเตอรี่ต่อชุดชาร์จเต็ม (V)

n_p = จำนวนมอดูลที่ต่อขนานกันของแผงพีวี

n_s = จำนวนเซลล์ที่ต่ออนุกรมกันของแผงพีวี

I_{rs}, q, A, = ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแผงพีวี

k, Temp

CCC = ช่วงเวลาการชาร์จด้วยอัตรากระแสคงที่ (h)

- V0 = ค่าแรงดันเริ่มต้นของแบตเตอรี่ต่อชุดขณะคิซชาร์จ (V)
- Vempty = ค่าแรงดันของแบตเตอรี่ต่อชุดเมื่อคิซชาร์จหมด (V)
- Rtot, K1, K2, nm, C = ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแบตเตอรี่ขณะคิซชาร์จ
- t = เวลา (h)
- tstop = ค่าเวลาที่แบตเตอรี่ทุกชุดหยุดชาร์จ (h)
- tfinal = ค่าเวลาสุดท้ายที่แผงพีวีมีปริมาณเพียงพอที่จะจ่ายให้มอเตอร์ (h)
- times[10] = ค่าเวลาที่แบตเตอรี่แต่ละชุดใช้ในการเริ่มชาร์จ (h), เป็นตัวแปรอาร์เรย์
- fitimesccc[10] = ค่าเวลาสิ้นสุดของช่วง CCC ของแบตเตอรี่แต่ละชุด (h), เป็นตัวแปรอาร์เรย์
- S[30000] = ค่าความเข้มแสงอาทิตย์ (W/m^2), เป็นตัวแปรอาร์เรย์
- Iph[30000] = ค่ากระแสโฟโต (A), เป็นตัวแปรอาร์เรย์
- Inet[30000] = ค่ากระแสที่แผงพีวีผลิตได้เมื่อหักส่วนที่จ่ายให้มอเตอร์ออกแล้ว (A)
- Ipmax[30000], Vpmax[30000] = ค่ากระแส (A) และแรงดัน (V) ที่ผลิตได้จากแผงพีวีที่ทำให้เกิดกำลังงานสูงสุดตามลำดับ
- Pmax[30000] = ค่ากำลังงานสูงสุดที่ผลิตได้จากแผงพีวี (W)
- Itot[30000], Vtot[30000], Ptot[30000] = ค่ากระแส (A), แรงดัน (V) และกำลังงาน (W) ที่โหลด (มอเตอร์ และ/หรือ แบตเตอรี่) ใช้งานจริง ตามลำดับ
- Ibatt[30000] = ค่ากระแสที่แบตเตอรี่ต้องการใช้ในการชาร์จช่วง CVC (A)
- *fp1, *fp2, *fp3 = พอยน์เตอร์ของไฟล์ต่างๆ และประกอบด้วยไฟล์ต่างๆ ดังนี้
- Count.dat เป็นไฟล์ที่ใช้บรรจุค่าดัชนีการนับทุกๆ ค่าของการสุ่มสัญญาณ
 - Current.dat เป็นไฟล์ที่ใช้บรรจุค่ากระแสที่โหลด (มอเตอร์ และ/หรือ แบตเตอรี่) ใช้งานจริง เพื่อนำไปศึกษาถึงพลวัตด้านกระแสของระบบ
 - Voltage.dat เป็นไฟล์ที่ใช้บรรจุค่าแรงดันที่โหลด (มอเตอร์ และ/หรือ แบตเตอรี่) ใช้งานจริง เพื่อนำไปศึกษาถึงพลวัตด้านแรงดันของระบบ
- โปรแกรมจำลองผลระบบพลังงานผสมผสาน sim1.cpp ได้รับการพัฒนาขึ้น โดยมีหน้าที่โดยรวมในการคำนวณหาค่าเวลาและพลังงานที่มอเตอร์และแบตเตอรี่แต่ละชุดต้องการใช้ในการ

ชาร์จ และบันทึกสถานภาพการใช้พลังงานของมอเตอร์และแบตเตอรี่ชุดนั้นๆ ซึ่งประกอบด้วยฟังก์ชันย่อย (subfunction) ดังต่อไปนี้

sim2 มีหน้าที่ในการคำนวณหาค่าต่างๆ ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบ อาทิเช่น แบบจำลองของแผงพีวี และแบบจำลองความเข้มแสงอาทิตย์ เป็นต้น เพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์ระบบพลังงาน และฟังก์ชันย่อยนี้ ยังมีหน้าที่ในการพิจารณาว่าแบตเตอรี่ชุดใดชาร์จเสร็จสิ้นสมบูรณ์แล้วบ้าง และจะต้องปลดแบตเตอรี่ชุดใดบ้างเมื่อพลังงานจากแผงพีวีไม่เพียงพอ

sim3 มีหน้าที่ในการคำนวณหาค่าเวลาและพลังงานที่มอเตอร์และแบตเตอรี่แต่ละชุดใช้ในการเริ่มชาร์จ โดยทำการพิจารณาในกรณีที่เริ่มชาร์จในช่วงเวลาที่แบตเตอรี่ก่อนหน้าชุดที่กำลังพิจารณายังชาร์จอยู่ในช่วง CCC อยู่ทุกชุด

sim4 มีหน้าที่ในการคำนวณหาค่าเวลาและพลังงานที่มอเตอร์และแบตเตอรี่แต่ละชุดใช้ในการเริ่มชาร์จ โดยทำการพิจารณาในกรณีที่เริ่มชาร์จในช่วงเวลาที่แบตเตอรี่ก่อนหน้าชุดที่กำลังพิจารณายังชาร์จอยู่ในช่วง CVC บ้างแล้วบางชุดหรือทุกชุด

sim5 มีหน้าที่ในการคำนวณหาค่ากระแสที่แบตเตอรี่ต้องการใช้ในการชาร์จช่วง CVC ที่ เป็นความสัมพันธ์กับฟังก์ชันย่อย sim4

sim6 มีหน้าที่ในการคิสรชาร์จพลังงานจากแบตเตอรี่ให้แก่มอเตอร์ เมื่อพลังงานจากแผงพีวีไม่มีความเพียงพอที่จะจ่ายให้แก่มอเตอร์ได้อีก

รายละเอียดของโปรแกรมอาจดูได้จากภาคผนวก ก. ของงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้

5.3 การศึกษาพลวัตทางพลังงานด้วยการจำลองผล

การศึกษพลวัตทางพลังงานของระบบในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ดำเนินการโดยอาศัยโปรแกรมจำลองผลที่พัฒนาขึ้น ซึ่งได้ทำการปรับเปลี่ยนข้อมูลค่าความเข้มแสงอาทิตย์ที่คิดเป็นร้อยละของวันที่ฟ้าเปิด จาก 100% จนถึง 50% โดยลดลงทีละ 10% ตามลำดับ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองผล สามารถแสดงเป็นลำดับตามค่าความเข้มแสงอาทิตย์ที่คิดเป็นร้อยละ พร้อมทั้งแสดงภาพพลวัตทางพลังงานของระบบประกอบ ได้ดังนี้

- กรณีความเข้มแสงอาทิตย์เป็น 100% ของวันที่ฟ้าเปิด

Motor take energy from solar panel at 0.21h

Batt string 1 charge start at time 0.66h

Which I,V,P for supply batt and motor = 28.49A,139.30V,3969W respectively

Batt string 2 charge start at time 0.88h

Which I,V,P for supply batt and motor = 44.49A,139.77V,6219W respectively

Batt string 3 charge start at time 1.28h

Which I,V,P for supply batt and motor = 60.49A,140.63V,8507W respectively

Batt string 4 charge start at time 1.65h

Which I,V,P for supply batt and motor = 73.56A,141.00V,10372W respectively

Batt string 5 charge start at time 1.94h

Which I,V,P for supply batt and motor = 82.42A,141.00V,11621W respectively

Batt string 1 charge full at time 5.45h

Batt string 2 charge full at time 5.67h

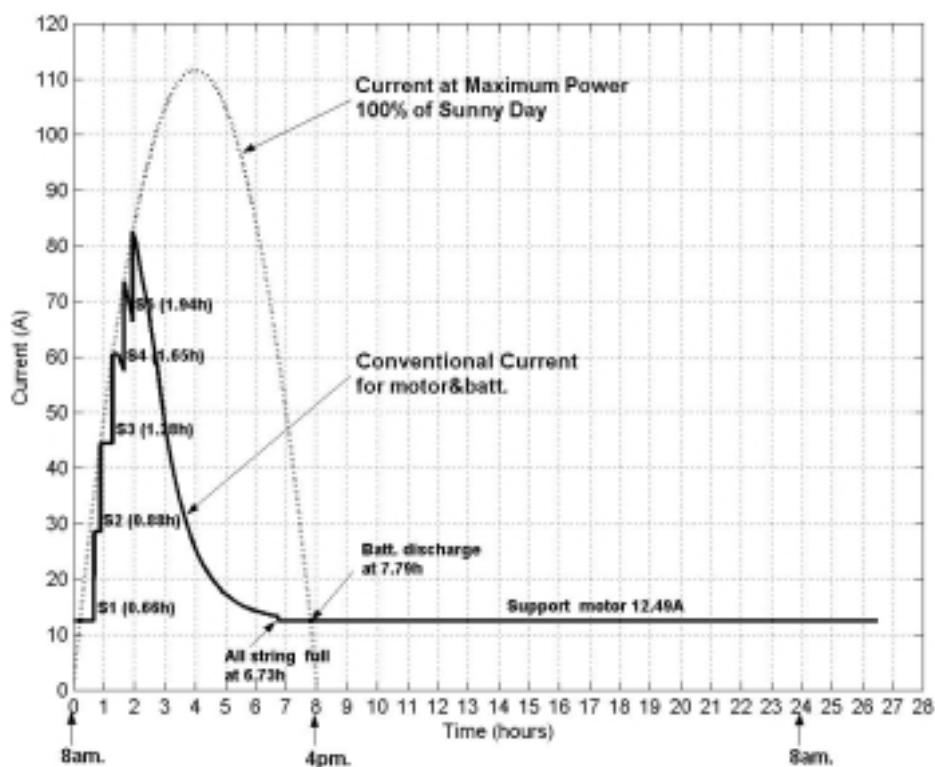
Batt string 3 charge full at time 6.07h

Batt string 4 charge full at time 6.44h

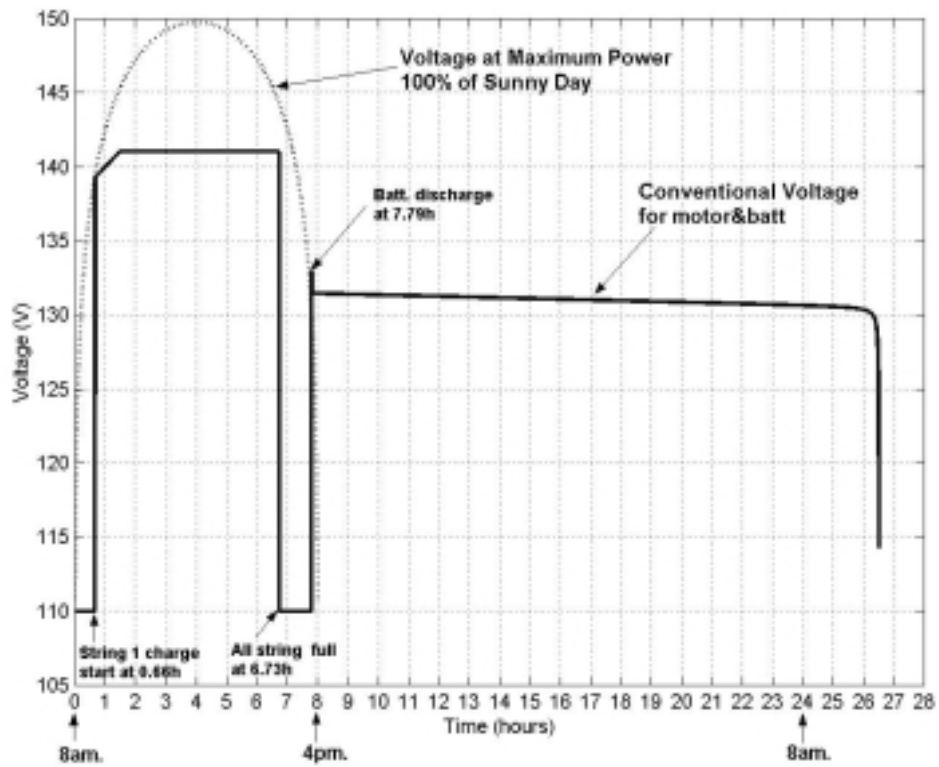
Batt string 5 or all string charge full at time 6.73h

Batt discharge energy to motor at time 7.79h

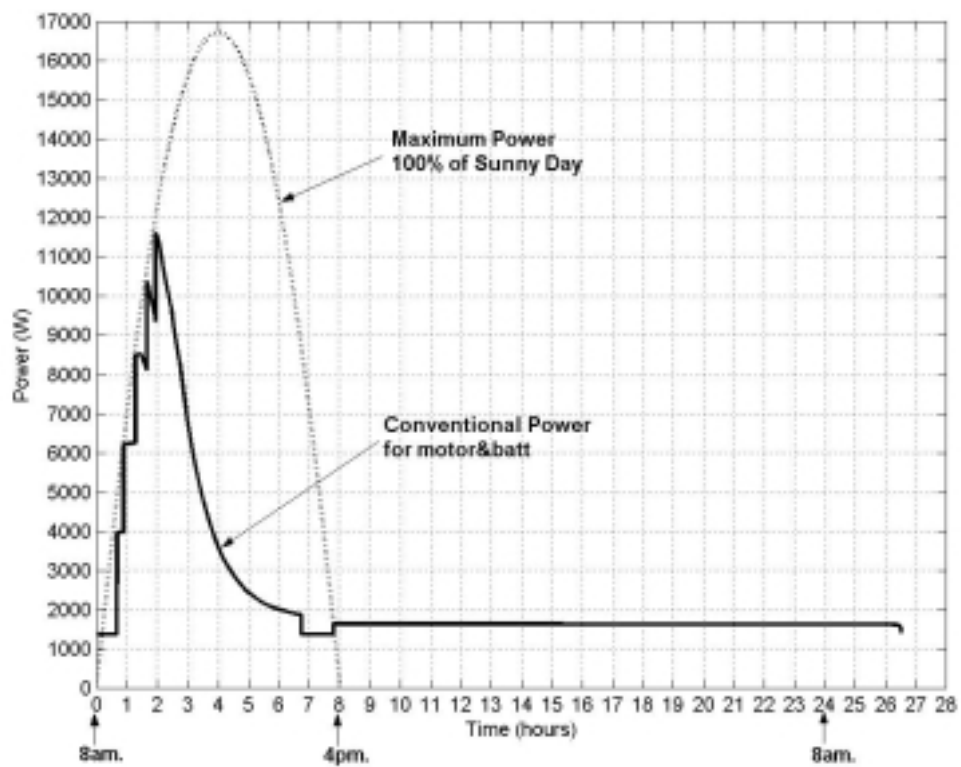
Batt discharge until totally empty at time 26.50h



ภาพที่ 5.5 พลวัตทางด้านกระแสของระบบกรณีความเข้มแสงอาทิตย์เป็น 100% ของวันที่ฟ้าเปิด



ภาพที่ 5.6 พลวัตทางด้านแรงดันของระบบกรณีความเข้มแสงอาทิตย์เป็น 100% ของวันที่ฟ้าเปิด



ภาพที่ 5.7 พลวัตทางด้านกำลังงานของระบบกรณีความเข้มแสงอาทิตย์เป็น 100% ของวันที่ฟ้าเปิด

ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองผลในกรณีความเข้มแสงอาทิตย์เป็น 100% ของวันที่ฟ้าเปิด จากภาพที่ 5.5, 5.6 และ 5.7 จะสังเกตเห็นว่า ระบบพลังงานผสมผสานในกรณีนี้ สามารถปฏิบัติการได้ ทั้งช่วงเวลากลางวันและช่วงเวลากลางคืน บรรลุตามวัตถุประสงค์ได้ตลอดทั้ง 24 ชั่วโมง โดยในภาพที่ 5.5 การชาร์จแบตเตอรี่ชุดที่ 1 เริ่มต้นที่เวลา 08.40 น. โดยประมาณ ซึ่งตั้งแต่นั้นมาประมาณ 08.15 น. เป็นต้นมา แผงพีวีมีความเพียงพอที่จะจ่ายให้มอเตอร์แล้ว ดังนั้นมอเตอร์จึงได้รับกระแสจากแผงพีวีด้วยปริมาณ 12.49 A เป็นฐานทุกกรณี ณ ตั้งแต่นั้นเป็นต้นมา โดยเราจะให้ความสำคัญแก่มอเตอร์เป็นลำดับแรกถ้าเปรียบเทียบกับกรชาร์จแบตเตอรี่ ส่วนแบตเตอรี่ชุดที่ 2 จะเข้าชาร์จที่เวลา 08.55 น. จากนั้นก็เป็นการชาร์จของแบตเตอรี่ชุดที่ 3, 4 และ 5 ไปตามลำดับ โดยจะสังเกตเห็นว่าเมื่อแบตเตอรี่ชุดที่ 5 เข้าชาร์จที่เวลา 09.55 น. แล้ว ปริมาณกระแสที่รับมาจากแผงพีวีที่แสดงด้วยกราฟเส้นทึบ จะลดลงแบบเอ็กซ์โปเนนเชียลอย่างเห็นได้ชัดตามลักษณะสมบัติของวงจรการชาร์จของแบตเตอรี่ โดยจะชาร์จเสร็จสิ้นสมบูรณ์ทั้ง 5 ลูก ที่เวลาประมาณ 14.45 น. และเมื่อกระแสที่ผลิตได้จากแผงพีวีซึ่งแสดงด้วยกราฟเส้นประ ไม่มีความเพียงพอที่จะจ่ายให้แก่มอเตอร์ได้แล้ว ก็จะเป็นหน้าที่ของแบตเตอรี่ในการจ่ายพลังงานให้แก่มอเตอร์แทน โดยเริ่มดิชาร์จพลังงานที่เวลาประมาณ 16.00 น. ตลอดทั้งช่วงเย็นและช่วงกลางคืนตามจุดมุ่งหมายของงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้

เมื่อพิจารณารูปคลื่นแรงดันที่รับมาจากแผงพีวีดังภาพที่ 5.6 เราจะสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนถึงวงจรการชาร์จของแบตเตอรี่ในช่วง CCC ตามด้วย CVC โดยมอเตอร์จะรับแรงดันจากแผงพีวีเป็นปริมาณ 110 V เป็นฐานทุกกรณี และจะสังเกตเห็นว่าเมื่อแบตเตอรี่ชาร์จเต็มหมดแล้วทั้ง 5 ลูก แรงดันที่รับมาจากแผงพีวีจะมีปริมาณเหลือเพียง 110 V เพื่อจ่ายให้แก่มอเตอร์เพียงอย่างเดียวเท่านั้น ในส่วนของกำลังไฟฟ้างภาพที่ 5.7 ซึ่งเป็นปริมาณที่สังเคราะห์ขึ้นจากกระแสและแรงดัน จะสังเกตเห็นว่า กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่รับมาจากแผงพีวีจะมีค่า 11.62 kW ในเวลาเพียงช่วงสั้นๆ เท่านั้น จากนั้นกำลังไฟฟ้าก็จะลดลงแบบเอ็กซ์โปเนนเชียลตามสภาพการใช้กระแสเพื่อชาร์จแบตเตอรี่ ดังนั้นในช่วงเวลาตั้งแต่ 11.00 น. จนถึง 16.00 น. จึงมีปริมาณกำลังไฟฟ้าเหลือเกินให้ใช้ประโยชน์อย่างอื่นได้อีกค่อนข้างมาก

- กรณีความเข้มแสงอาทิตย์เป็น 90% ของวันที่ฟ้าเปิด

Motor take energy from solar panel at 0.23h

Batt string 1 charge start at time 0.74h

Which I,V,P for supply batt and motor = 28.49A,139.30V,3969W respectively

Batt string 2 charge start at time 1.00h

Which I,V,P for supply batt and motor = 44.49A,139.84V,6222W respectively

Batt string 3 charge start at time 1.46h

Which I,V,P for supply batt and motor = 60.49A,140.85V,8520W respectively

Batt string 4 charge start at time 1.84h

Which I,V,P for supply batt and motor = 71.47A,141.00V,10078W respectively

Batt string 5 charge start at time 2.17h

Which I,V,P for supply batt and motor = 79.77A,141.00V,11248W respectively

Batt string 1 charge full at time 5.53h

Batt string 2 charge full at time 5.79h

Batt string 3 charge full at time 6.25h

Batt string 4 charge full at time 6.63h

Batt string 5 or all string charge full at time 6.96h

Batt discharge energy to motor at time 7.77h

Batt discharge until totally empty at time 26.47h

กรณีความเข้มแสงอาทิตย์เป็น 90% ของวันที่ฟ้าเปิด ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองผลจะเป็นลักษณะเดียวกันกับกรณี 100% ทุกประการ ซึ่งรูปกราฟต่างๆ ก็คล้ายคลึงกับภาพที่ 5.5, 5.6 และ 5.7 เป็นอย่างมาก ดังนั้นจึงขอละเว้นที่จะอธิบายรายละเอียด แต่อาจสรุปโดยรวมได้ว่า แผงพีวีสามารถจ่ายพลังงานให้แก่มอเตอร์ได้อย่างเพียงพอด้วยปริมาณกระแส 12.49 A และแรงดัน 110 V อีกทั้งยังชาร์จแบตเตอรี่ได้เสร็จสิ้นสมบูรณ์ทั้ง 5 ลูก ก่อนเวลา 16.00 น. ซึ่งบรรลุตามวัตถุประสงค์ในการใช้งานมอเตอร์ตลอดทั้ง 24 ชั่วโมง เช่นกัน

- กรณีความเข้มแสงอาทิตย์เป็น 80% ของวันที่ฟ้าเปิด

Motor take energy from solar panel at 0.27h

Batt string 1 charge start at time 0.85h

Which I,V,P for supply batt and motor = 28.49A,139.30V,3969W respectively

Batt string 2 charge start at time 1.15h

Which I,V,P for supply batt and motor = 44.49A,139.94V,6226W respectively

Batt string 3 charge start at time 1.69h

Which I,V,P for supply batt and motor = 59.79A,141.00V,8430W respectively

Batt string 4 charge start at time 2.07h

Which I,V,P for supply batt and motor = 68.86A,141.00V,9709W respectively

Batt string 5 charge start at time 2.48h

Which I,V,P for supply batt and motor = 76.58A,141.00V,10798W respectively

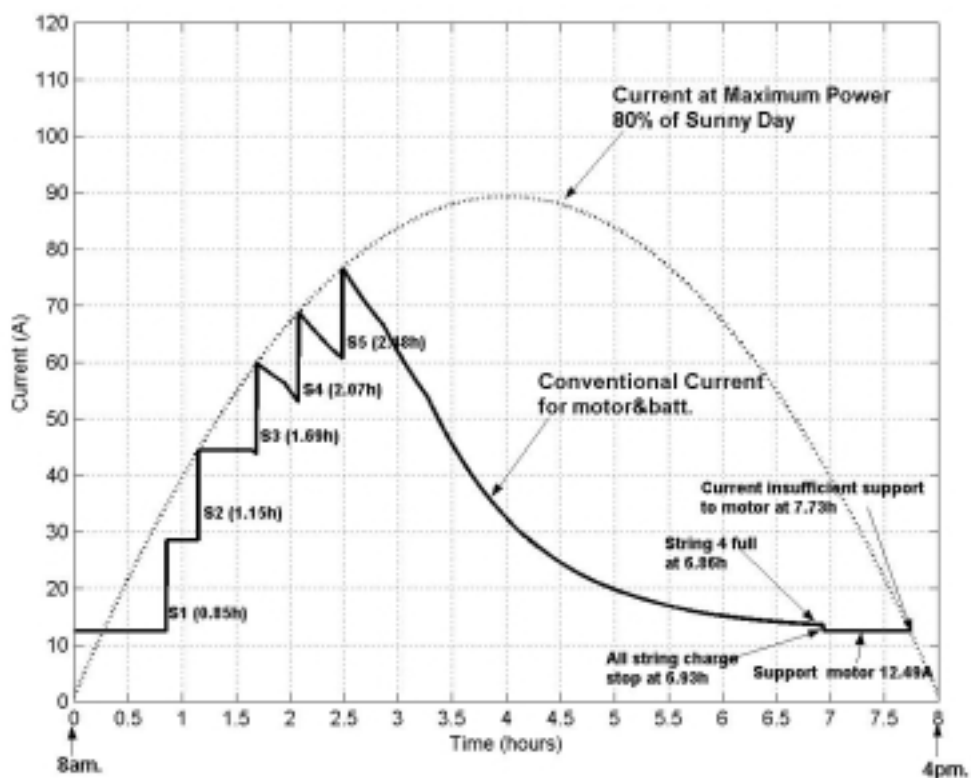
Batt string 1 charge full at time 5.64h

Batt string 2 charge full at time 5.94h

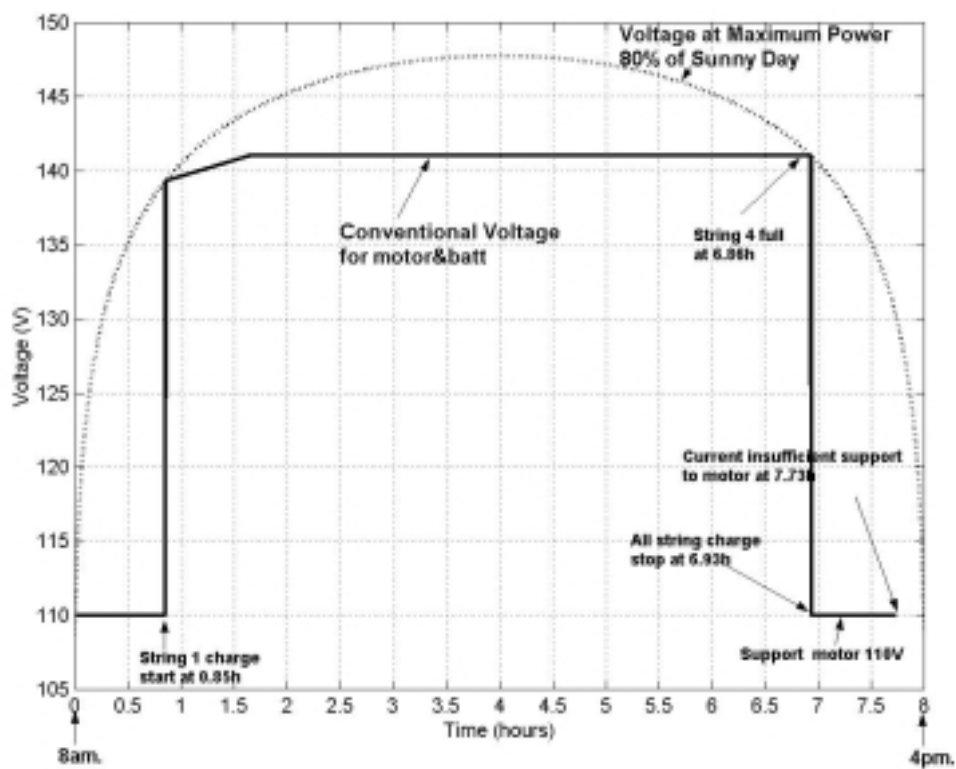
Batt string 3 charge full at time 6.48h

Batt string 4 charge full at time 6.86h

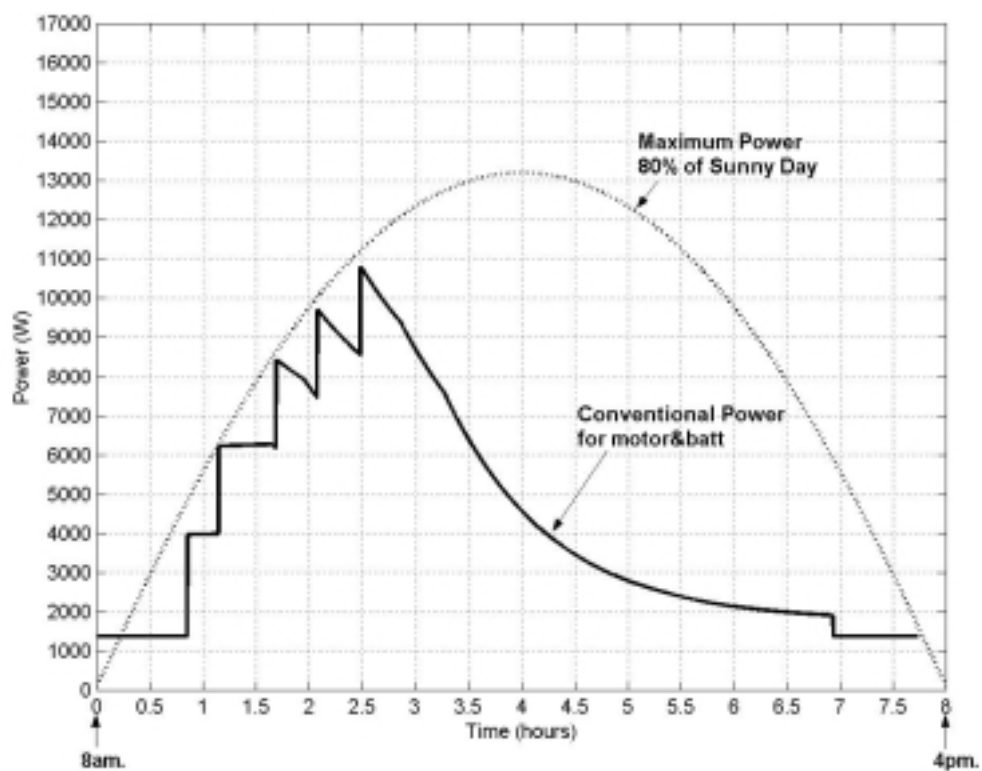
Batt all string charge stop at time 6.93h



ภาพที่ 5.8 พลวัตทางด้านกระแสของระบบกรณีความเข้มแสงอาทิตย์เป็น 80% ของวันที่ฟ้าเปิด



ภาพที่ 5.9 พลวัตทางด้านแรงดันของระบบกริดความเข้มแสงอาทิตย์เป็น 80% ของวันที่ฟ้าเปิด



ภาพที่ 5.10 พลวัตทางด้านกำลังงานของระบบกริดความเข้มแสงอาทิตย์เป็น 80% ของวันที่ฟ้าเปิด

กรณีความเข้มแสงอาทิตย์เป็น 80% ของวันที่ฟ้าเปิด ผลลัพธ์ที่ได้จะคล้ายคลึงกับกรณีของ 90% และ 100% ที่ผ่านมา โดยจากภาพที่ 5.8, 5.9 และ 5.10 จะสังเกตเห็นว่า การชาร์จแบตเตอรี่เสร็จสิ้นสมบูรณ์เพียง 4 ชุค หรือ 40 ลูก ภายในเวลา 15.00 น. ซึ่งแบตเตอรี่ชุดที่ 5 ยังชาร์จไม่สมบูรณ์เนื่องจากแรงดันที่ผลิตได้จากแผงฟิวีดังกล่าวแสดงด้วยภาพที่ 5.9 มีความไม่เพียงพอในช่วงท้ายของการชาร์จ การทำงานของระบบหลังเวลา 15.45 น. ไปแล้ว ยังคงเหมือนกับสองกรณีแรก การนำเสนอผลการจำลองสถานการณ์จึงนำเฉพาะในช่วงเวลา 08.00–16.00 น. มาขยายให้เห็นรายละเอียด โดยอาจสรุปได้ว่า กรณีที่แดดอ่อนจนความเข้มแสงอาทิตย์ต่ำกว่า 80% ของวันที่ฟ้าเปิดนั้น แบตเตอรี่ไม่อาจชาร์จได้สมบูรณ์ทั้ง 5 ชุค ดังนั้นการปฏิบัติงานตลอดทั้ง 24 ชั่วโมง จึงไม่อาจทำได้ เพราะแบตเตอรี่มีพลังงานสะสมไม่เพียงพอ และไม่ควรรใช้แบตเตอรี่หากยังชาร์จไม่เสร็จสิ้นสมบูรณ์ เพราะจะส่งผลให้แบตเตอรี่มีอายุการใช้งานที่สั้นลง แต่ในกรณีที่มีความจำเป็นต้องใช้แบตเตอรี่ในช่วงเย็นและช่วงค่ำ ก็ควรเลือกแต่เพียงชุดที่ชาร์จอย่างสมบูรณ์แล้วมาใช้งานเท่านั้น โดยอาจจัดให้ระบบทำงานได้ตลอดวันเพียง 10 – 20 ชั่วโมงเท่านั้น แล้วแต่กรณีไป

- กรณีความเข้มแสงอาทิตย์เป็น 70% ของวันที่ฟ้าเปิด

Motor take energy from solar panel at 0.31h

Batt string 1 charge start at time 1.00h

Which I,V,P for supply batt and motor = 28.49A,139.30V,3969W respectively

Batt string 2 charge start at time 1.36h

Which I,V,P for supply batt and motor = 44.49A,140.08V,6232W respectively

Batt string 3 charge start at time 1.96h

Which I,V,P for supply batt and motor = 58.00A,141.00V,8178W respectively

Batt string 4 charge start at time 2.40h

Which I,V,P for supply batt and motor = 65.70A,141.00V,9264W respectively

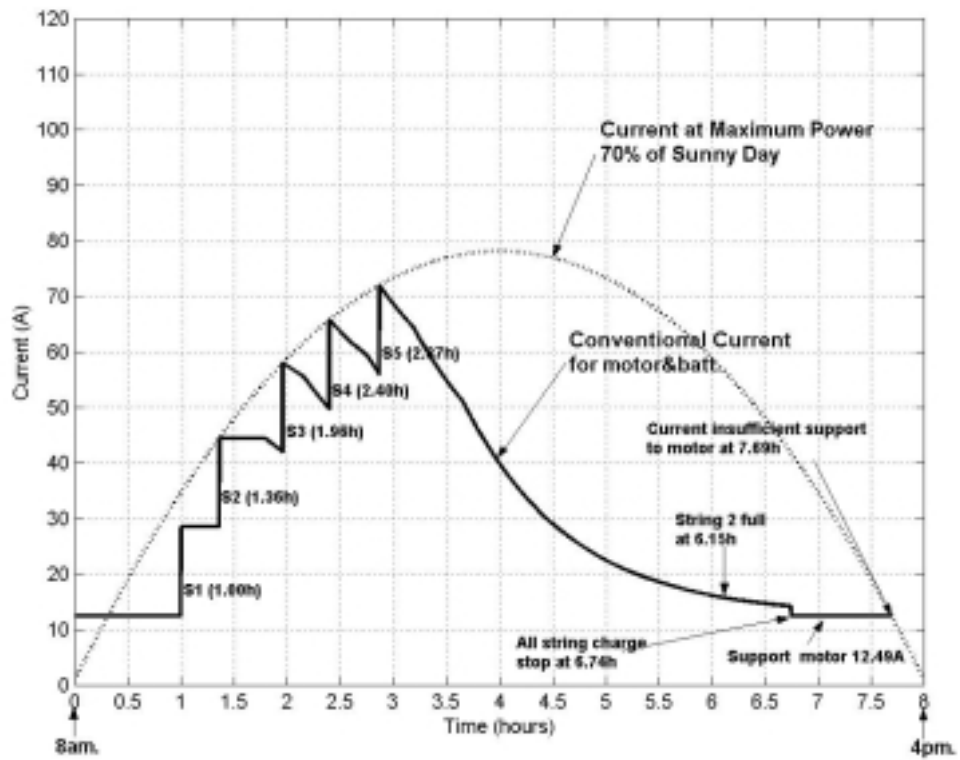
Batt string 5 charge start at time 2.87h

Which I,V,P for supply batt and motor = 71.92A,141.00V,10141W respectively

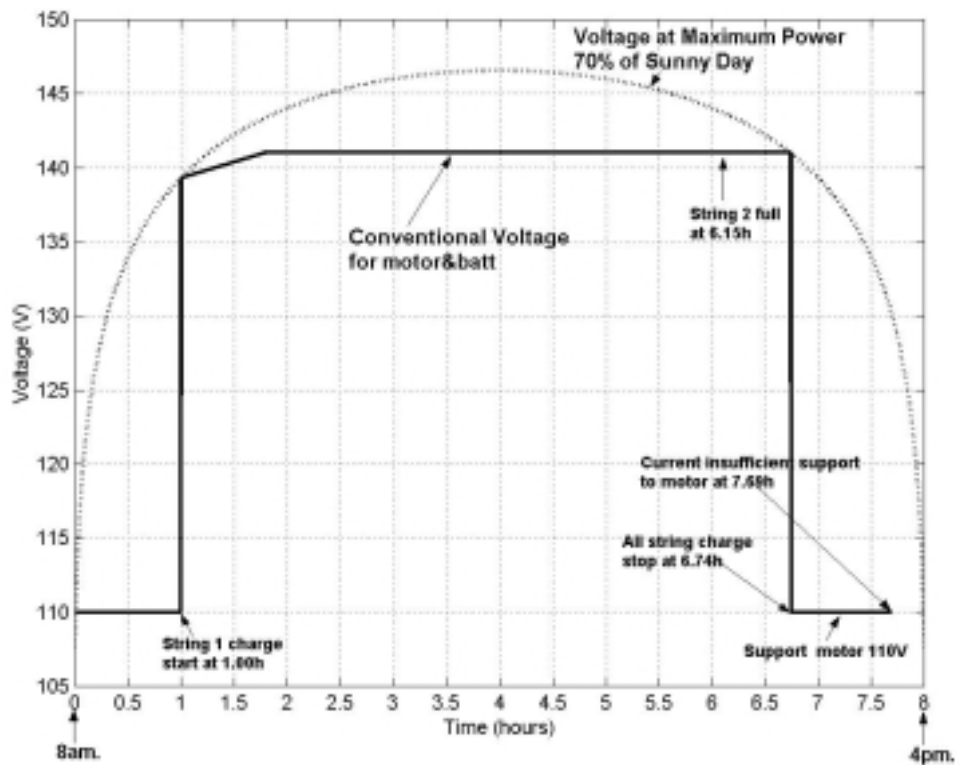
Batt string 1 charge full at time 5.79h

Batt string 2 charge full at time 6.15h

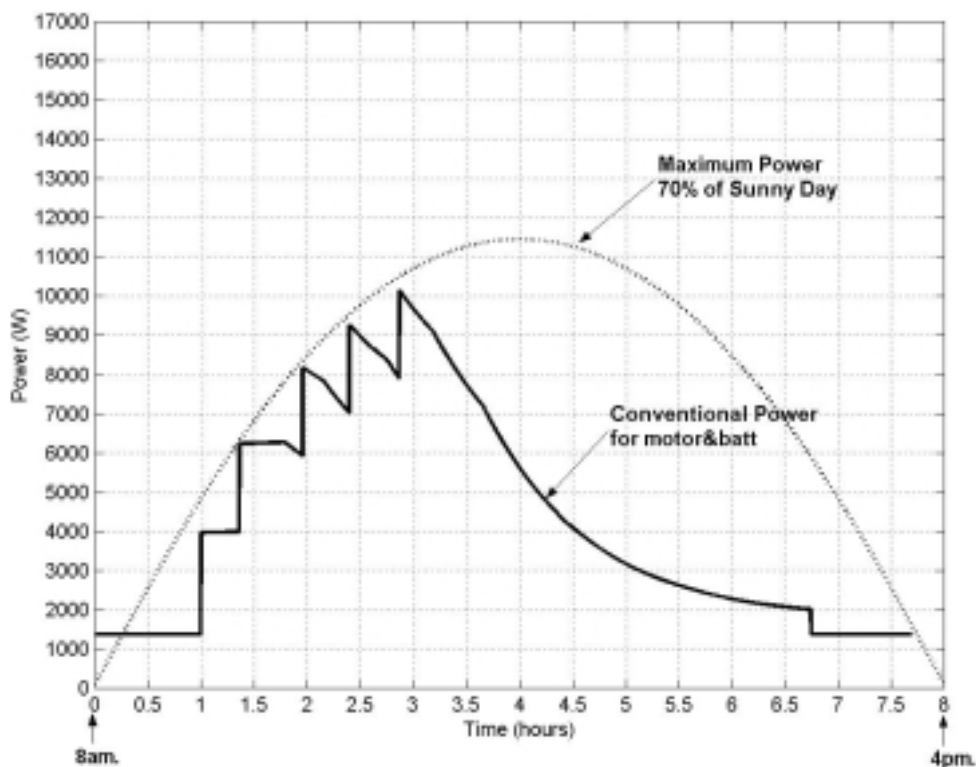
Batt all string charge stop at time 6.74h



ภาพที่ 5.11 พลวัตทางด้านกระแสของระบบกรณีความเข้มแสงอาทิตย์เป็น 70% ของวันที่ฟ้าเปิด



ภาพที่ 5.12 พลวัตทางด้านแรงดันของระบบกรณีความเข้มแสงอาทิตย์เป็น 70% ของวันที่ฟ้าเปิด



ภาพที่ 5.13 พลาวัตทางด้านกำลังงานของระบบกรณีความเข้มแสงอาทิตย์เป็น 70% ของวันที่ฟ้าเปิด

กรณีความเข้มแสงอาทิตย์เป็น 70% ของวันที่ฟ้าเปิด ดังผลการจำลองและภาพที่ 5.11, 5.12 และ 5.13 ที่ได้นำเสนอ จะสังเกตเห็นว่า แสงอาทิตย์ตลอดทั้งวันเริ่มมีค่าอ่อนจนส่งผลต่อการทำงานของระบบเป็นอย่างมาก หากเราพิจารณากราฟของกระแสดังภาพที่ 5.11 จะเห็นได้ว่า ระบบสามารถนำแบตเตอรี่เข้าชาร์จได้ครบทั้ง 5 ชุด ที่เวลา 09.00 น. 09.22 น. 09.58 น. 10.24 น. และ 10.52 น. ตามลำดับ แต่เนื่องจากแรงดันมีค่าอ่อนลงในช่วงบ่าย จนไม่สามารถชาร์จในช่วง CVC ได้ สมบูรณ์ครบทุกชุด การชาร์จแบตเตอรี่ทุกชุดจึงยุติลงที่เวลา 14.45 น. ดังกราฟของแรงดันในภาพที่ 5.12 ดังนั้นจะมีเพียงแค่ 2 ชุดแรกเท่านั้นที่ผ่านการชาร์จอย่างสมบูรณ์ โดยแบตเตอรี่ในชุดที่ 3, 4 และ 5 ต้องรอการชาร์จต่อครั้งใหม่ในวันรุ่งขึ้นที่มีแสง

- กรณีความเข้มแสงอาทิตย์เป็น 60% ของวันที่ฟ้าเปิด

Motor take energy from solar panel at 0.37h

Batt string 1 charge start at time 1.20h

Which I,V,P for supply batt and motor = 28.49A,139.30V,3969W respectively

Batt string 2 charge start at time 1.67h

Which I,V,P for supply batt and motor = 44.49A,140.30V,6242W respectively

Batt string 3 charge start at time 2.35h

Which I,V,P for supply batt and motor = 55.71A,141.00V,7855W respectively

Batt string 4 charge start at time 2.87h

Which I,V,P for supply batt and motor = 61.71A,141.00V,8700W respectively

Batt string 5 charge start at time 3.46h

Which I,V,P for supply batt and motor = 65.74A,141.00V,9270W respectively

Batt string 1 charge full at time 5.99h

Batt string 2 charge full at time 6.46h

Batt all string charge stop at time 6.46h

ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองผลในกรณีความเข้มแสงอาทิตย์เป็น 60% ของวันที่ฟ้าเปิดนี้ จะให้ผลที่คล้ายกับกรณี 70% เป็นอย่างมาก การชาร์จแบตเตอรี่ทำได้สมบูรณ์เพียง 2 ชุด หรือ 20 ลูก เพียงแต่เวลาในการเข้าชาร์จและชาร์จเสร็จสิ้นมีเวลาที่ล่าช้าออกไปเมื่อเทียบกับกรณี 70% ส่วนการจ่ายกำลังให้มอเตอร์ในช่วงเวลากลางวันนั้นก็ยังคงทำได้ตามปกติ ดังนั้นในกรณีนี้จึงไม่ขออธิบายรายละเอียดซ้ำอีก

- กรณีความเข้มแสงอาทิตย์เป็น 50% ของวันที่ฟ้าเปิด

Motor take energy from solar panel at 0.45h

Batt string 1 charge start at time 1.52h

Which I,V,P for supply batt and motor = 28.49A,139.30V,3969W respectively

Batt string 2 charge start at time 2.19h

Which I,V,P for supply batt and motor = 44.49A,140.73V,6261W respectively

Batt string 3 charge start at time 2.99h

Which I,V,P for supply batt and motor = 52.32A,141.00V,7377W respectively

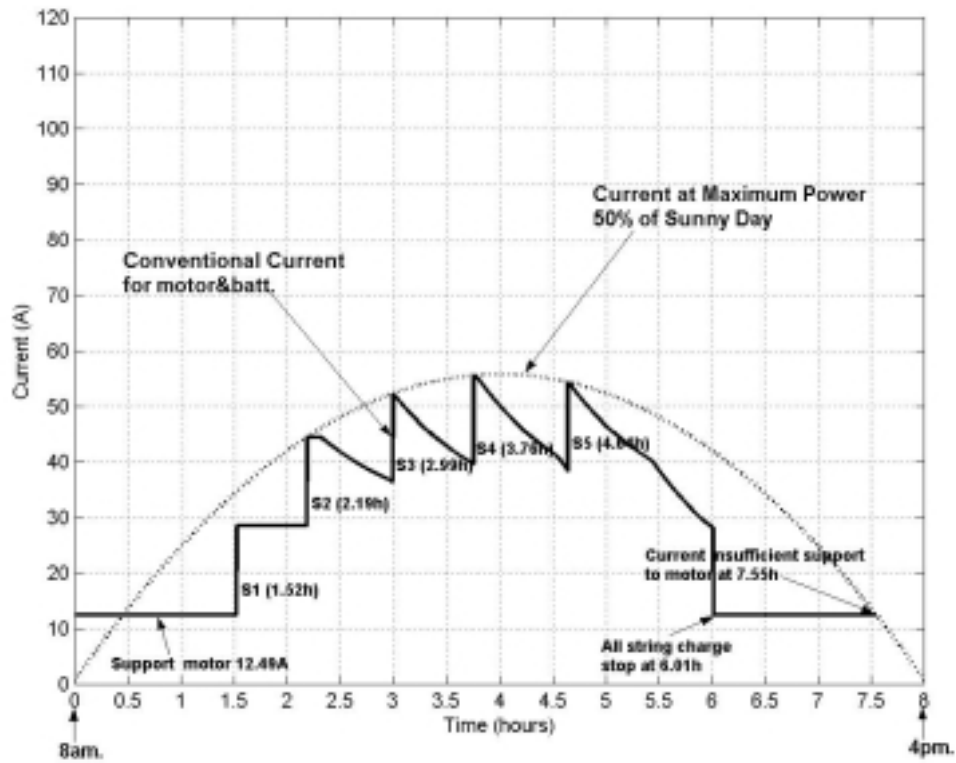
Batt string 4 charge start at time 3.76h

Which I,V,P for supply batt and motor = 55.60A,141.00V,7840W respectively

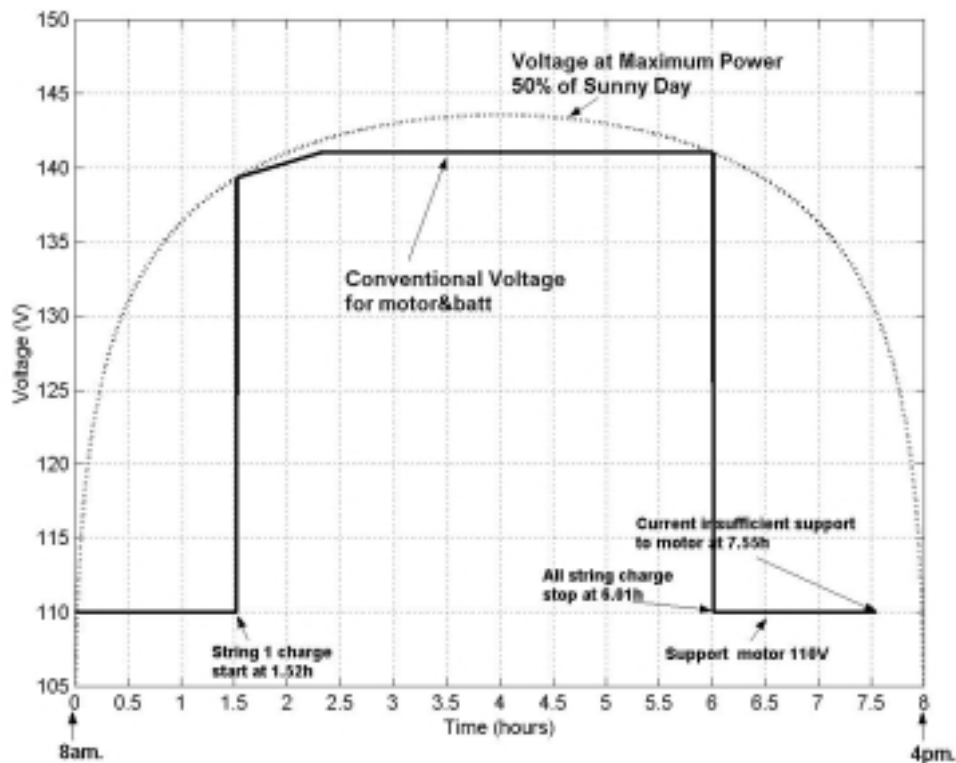
Batt string 5 charge start at time 4.64h

Which I,V,P for supply batt and motor = 54.38A,141.00V,7668W respectively

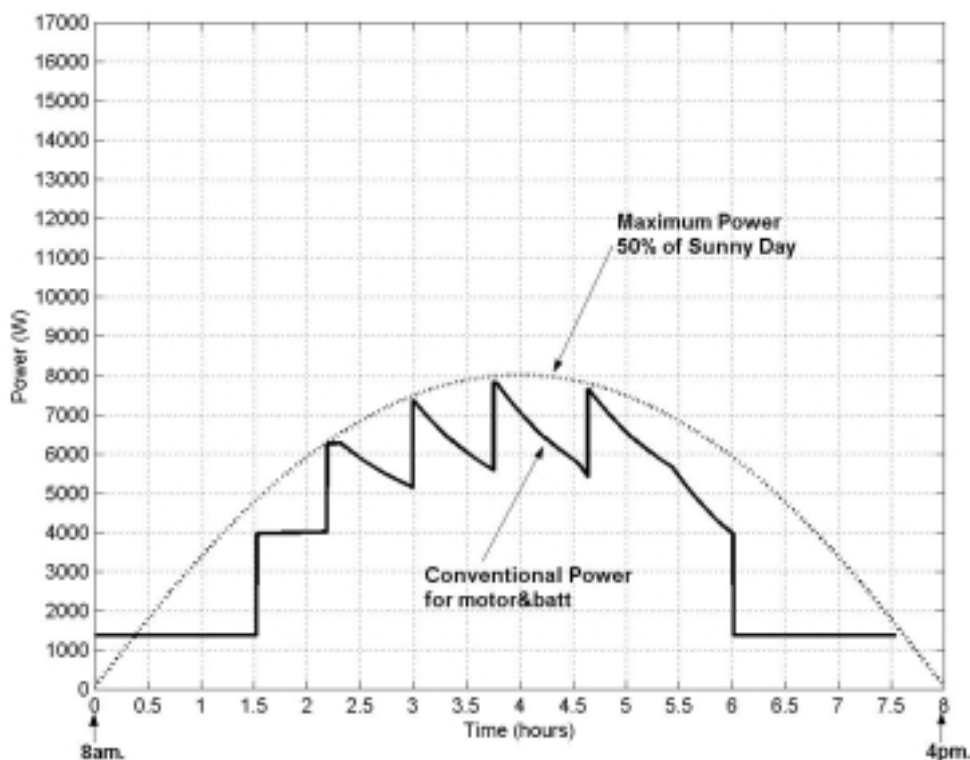
Batt all string charge stop at time 6.01h



ภาพที่ 5.14 พลวัตทางด้านกระแสของระบบกรณีความเข้มแสงอาทิตย์เป็น 50% ของวันที่ฟ้าเปิด



ภาพที่ 5.15 พลวัตทางด้านแรงดันของระบบกรณีความเข้มแสงอาทิตย์เป็น 50% ของวันที่ฟ้าเปิด



ภาพที่ 5.16 พลาวัตทางด้านกำลังงานของระบบกรณีความเข้มแสงอาทิตย์เป็น 50% ของวันที่ฟ้าเปิด

กรณีความเข้มแสงอาทิตย์เป็น 50% ของวันที่ฟ้าเปิดนั้น จากผลการจำลองและภาพที่ 5.14, 5.15 และ 5.16 ที่ได้นำเสนอ จะสังเกตเห็นว่า ระบบยังสามารถใช้พลังงานจากแผงฟิวิจับมอเตอร์ได้ตามปกติตลอดในช่วงเวลากลางวัน แต่การชาร์จแบตเตอรี่จะประสบปัญหาโดยไม่สามารถชาร์จได้สมบูรณ์เลยแม้แต่ชุดเดียว และจากภาพที่ 5.16 จะเห็นได้ว่า ในกรณีที่ความเข้มแสงอ่อนมากเช่นนี้ กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ผลิตได้จากแผงฟิวิจะมีเพียงแค่ 8 kW เท่านั้น

เมื่อประมวลผลจากการจำลองผลระบบเข้าด้วยกัน โดยพิจารณาการชาร์จให้ดำเนินไปอย่างสอดคล้องกับลักษณะสมบัติของแบตเตอรี่ เราจึงอาจสรุปได้ว่า ระบบพลังงานผสมผสานในงานวิจัยนี้ สามารถผลิตพลังงานได้มากพอเพื่อจ่ายให้แก่มอเตอร์ตลอดทั้งช่วงเวลากลางวัน ซึ่งเราให้ความสำคัญแก่มอเตอร์ก่อนเป็นลำดับแรก โดยในกรณีที่ความเข้มแสงอาทิตย์มีค่าประมาณน้อยกว่า 80% ของวันที่ฟ้าเปิด จะไม่สามารถชาร์จแบตเตอรี่ได้เสร็จสิ้นสมบูรณ์ทั้ง 50 ลูก อย่างไรก็ตาม ถ้าความเข้มแสงอาทิตย์โดยเฉลี่ยตลอดทั้งวันไม่ต่ำมากจนถึงระดับ 50 – 55% แล้วนั้น ในช่วงเวลาหลัง 11.00 น. เป็นต้นไป จะมีพลังงานบางส่วนที่ผลิตได้จากแผงฟิวิ มีค่าเหลือเกินพอที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์อย่างอื่นได้อีก

5.4 สรุป

การใช้งานระบบพลังงานผสมผสานมีความซับซ้อน เนื่องจากลักษณะสมบัติอันไม่เป็นเชิงเส้นของแผงพีวีและแบตเตอรี่ แบตเตอรี่ที่ใช้ในระบบมีจำนวนมากเพื่อประกันการทำงานของระบบให้ได้ 24 ชั่วโมง ความต้องการในการชาร์จแบตเตอรี่อย่างพอเพียงจึงทวีความซับซ้อนต่อการใช้งานระบบดังกล่าว การทำความเข้าใจพลวัตของระบบอย่างละเอียดและลึกซึ้งจึงยากเกินกว่าที่จะนึกหรือจินตนาการได้ เป็นเหตุให้ต้องพึ่งพาเทคนิคการจำลองผลระบบด้วยคอมพิวเตอร์ดังที่บทที่ 5 ได้นำเสนอไว้ โปรแกรมจำลองผลระบบและอัลกอริทึมการชาร์จแบตเตอรี่ในบทนี้ได้รับการพัฒนาขึ้นด้วย BORLAND C++TM โดยมีโครงสร้างอธิบายได้ด้วยแผนภูมิดังภาพที่ 5.4 และมีรายละเอียดของโปรแกรมดังปรากฏอยู่ในภาคผนวก ก. ของงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ผลการจำลองระบบทำให้ทราบว่าเมื่อพ้นเวลา 11.00 น. ไปแล้ว ยังมีพลังงานจากแผงพีวีไปใช้ประโยชน์อย่างอื่นได้อีกมาก โดยการพัฒนาโปรแกรมจำลองผลในบทนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อนำพาไปสู่การออกแบบและอนุวัตตัวควบคุมการใช้พลังงานและดำเนินการทดสอบตัวควบคุมนั้น ดังที่จะได้กล่าวถึงในบทต่อไป

บทที่ 6

การออกแบบตัวควบคุมกำกับสั่งการโดยใช้ตรรกศาสตร์ฟัซซี

6.1 บทนำ

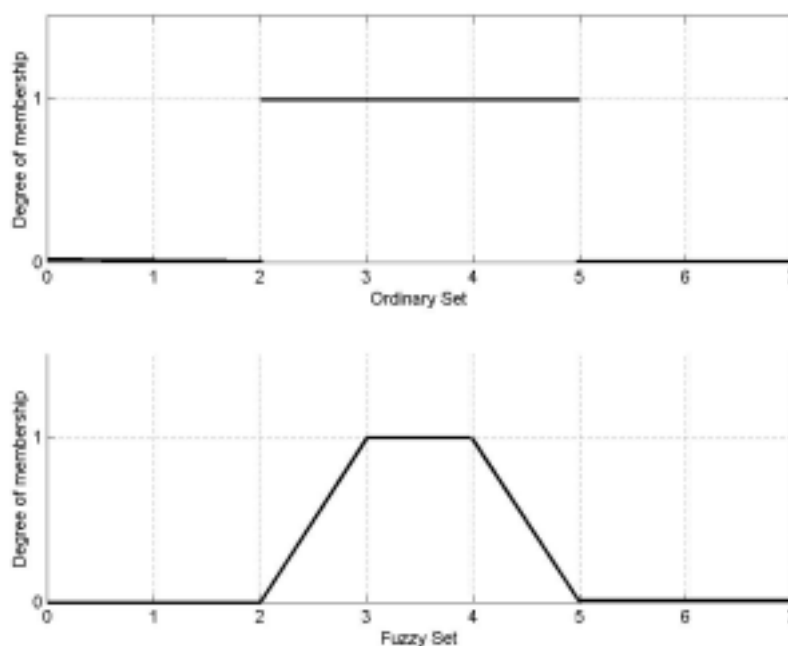
การศึกษาพลวัตทางพลังงานของระบบ เพื่อทำความเข้าใจระบบอย่างละเอียดและถ่องแท้ โดยอาศัยโปรแกรมจำลองผลระบบพลังงานผสมผสานที่ผ่านมาในบทที่ 5 นั้น มีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นประโยชน์สำหรับการออกแบบและอนุวัตตัวควบคุมกำกับสั่งการ (supervisory controller) ในการใช้พลังงานจากแผงพีวีให้ได้มากที่สุด ดังจะได้แสดงรายละเอียดไว้ในบทที่ 6 นี้ ระบบควบคุมแบบกำกับสั่งการเป็นระบบควบคุมที่มีตัวควบคุมให้การกำกับสั่งการดำเนินงาน ในทำนองที่คล้ายกับการสั่งการของมนุษย์ที่เป็นผู้ควบคุมการปฏิบัติ เนื้อหาในบทที่ 6 ของงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะว่าด้วยเรื่อง การออกแบบและอนุวัตตัวควบคุมแบบกำกับสั่งการ โดยใช้ตรรกศาสตร์ฟัซซี (fuzzy logic) ในการควบคุมและจัดการพลังงาน โดยใช้ผลการศึกษาระบบจำลองผลระบบด้วยคอมพิวเตอร์ เป็นรากฐานในการออกแบบฟัซซีอัลกอริทึมเพื่อเขียนแบบแนวความคิดของมนุษย์ จากนั้นดำเนินการอนุวัตฟัซซีอัลกอริทึมดังกล่าวด้วยโปรแกรมภาษา C เพื่อทดสอบและวิเคราะห์การใช้พลังงานของระบบที่มีตัวควบคุมกำกับสั่งการ พร้อมทั้งนำเสนอผลการศึกษาระบบใช้งานของตัวควบคุมดังกล่าว และดำเนินการเปรียบเทียบพฤติกรรมทางด้านพลังงานของระบบก่อนและหลังมีตัวควบคุม เพื่อเป็นการแสดงให้เห็นถึงประโยชน์และประสิทธิผลของตัวควบคุมที่พัฒนาขึ้น ทำให้เกิดระบบพลังงานผสมผสานที่มีประสิทธิภาพสูงเชิงการใช้พลังงาน

6.2 ทฤษฎีฟัซซีเซตและระบบควบคุมแบบฟัซซี

ฟัซซีลอจิกถือกำเนิดขึ้นเมื่อปี 1965 โดย ลอตฟี ซาเดห์ (Lotfi Zadeh) ฟัซซีลอจิกมีพื้นฐานอยู่บนทฤษฎีฟัซซีเซต หลักสำคัญของทฤษฎีฟัซซีเซต คือ ขอมรับสมาชิกที่มีลักษณะตามเซตเพียงบางส่วนเข้ามาเป็นสมาชิก โดยมีการจัดค่าระดับของการเป็นสมาชิก (degree of membership) ซึ่งแตกต่างจากทฤษฎีเซตดั้งเดิม (ordinary set or crisp set) ทฤษฎีเซตดั้งเดิมจะเน้นชัดเจนว่าเป็นสมาชิกของเซตปกติหรือไม่เท่านั้น ไม่มีการเป็นสมาชิกของเซตเพียงบางส่วน ฟัซซีลอจิกขอมรับการเป็นสมาชิกของสมาชิกที่มีลักษณะตามเซตเพียงบางส่วน ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงทีละน้อยระหว่างการมีคุณสมบัติของการเป็นสมาชิกอย่างครบถ้วนกับไม่มีคุณสมบัติของการเป็นสมาชิกเลย ในลอจิกทั่วไปจะกำหนดเพียงว่าเป็น 0 เป็น 1 เป็นสมาชิกของเซตหรือไม่ หรือว่าถูกกับผิด แต่ฟัซซี

เซตจะยอมรับสมาชิกที่มีลักษณะที่ถูกเพียงบางส่วนและผิดเพียงบางส่วน โดยมีค่าความเป็นสมาชิกอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 เมื่อ 0 หมายถึงการไม่เป็นสมาชิกในเซต และ 1 หมายถึงการเป็นสมาชิกในเซตอย่างสมบูรณ์ โดยจะมีการกำหนดค่าความเป็นสมาชิกผ่านฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (membership function) เพื่อระบุค่าความเป็นสมาชิกของเซตของสมาชิกใดๆ ในเอกภพสัมพัทธ์ (universe of discourse)

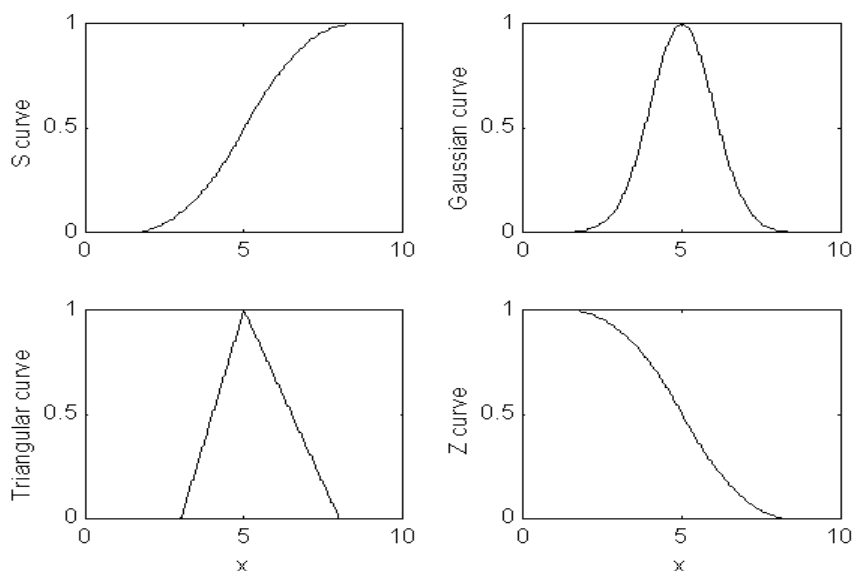
ความแตกต่างในเรื่องของความเป็นสมาชิกและไม่เป็นสมาชิกในเซต ระหว่างเซตดั้งเดิมกับฟuzzyเซตอาจแสดงได้ดังภาพที่ 6.1 ซึ่งเป็นการแสดงเซตของกลุ่มตัวเลขจาก 0 ถึง 7 โดยกราฟด้านบนของภาพที่ 6.1 แสดงให้เห็นว่าเลขจำนวนจริงจาก 2 ถึง 5 เป็นสมาชิกของเซตอย่างสมบูรณ์ ส่วนที่เหลือนอกย่านดังกล่าวไม่เป็นสมาชิกอย่างสิ้นเชิง ส่วนกราฟด้านล่างแสดงความเป็นสมาชิกอย่างค่อยเป็นค่อยไปของเลขจำนวนจริงจาก 2 ถึง 5 ในเซตแบบฟuzzyเซต ส่วนที่เหลือนอกย่านดังกล่าวไม่เป็นสมาชิกของฟuzzyเซตนั้นเลย



ภาพที่ 6.1 ความแตกต่างของสมาชิกภาพระหว่างเซตดั้งเดิมกับฟuzzyเซต

กราฟแสดงฟังก์ชันความเป็นสมาชิกในฟuzzyเซตอาจมีรูปร่างเช่นใดก็ได้ เช่น S-ฟังก์ชัน Z-ฟังก์ชัน รูปสามเหลี่ยม และรูประฆังคว่ำ เป็นต้น ดังแสดงด้วยภาพที่ 6.2 กราฟแสดงสมาชิกภาพดังกล่าวอาจได้รับการเขียนขึ้นจากความรู้และประสบการณ์ของมนุษย์โดยตรง (heuristic) การกำหนดความเป็นสมาชิกภาพในลักษณะเช่นนี้ เรียกว่าเป็นแบบอัตวิสัย (subjective) อีกลักษณะ

หนึ่งอาจกำหนดรูปแบบของความเป็นสมาชิกภาพ โดยอาศัยผลการวิเคราะห์เชิงคำนวณที่เกี่ยวข้องกับกลุ่มวัตถุหรือสิ่งของที่ต้องการให้มีการแบ่งแยกความเป็นสมาชิกและไม่เป็นสมาชิกในฟuzzyเซต วิธีการเช่นนี้ เรียกว่าเป็นแบบวัตถุวิสัย (objective)



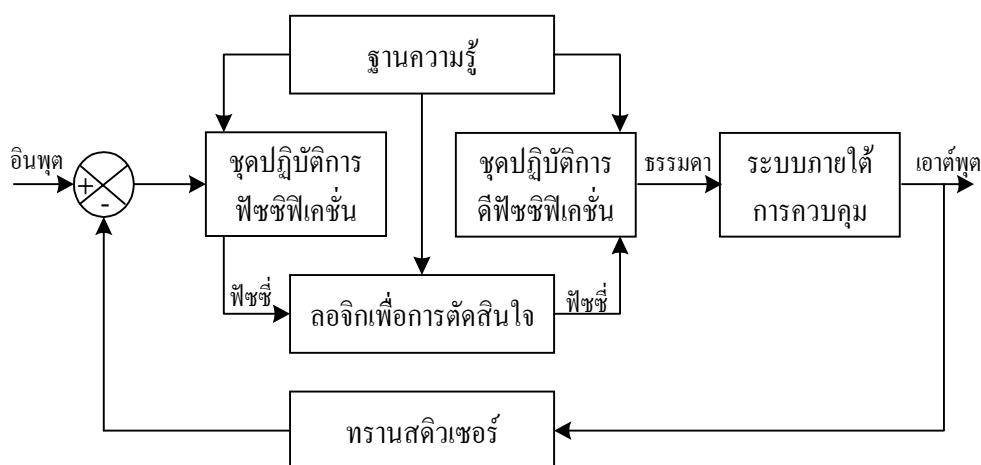
ภาพที่ 6.2 ตัวอย่างของฟังก์ชันความเป็นสมาชิก

ตรรกแบบฟuzzy สามารถใช้เป็นรากฐานเพื่ออธิบายกลไกการตัดสินใจและความคิดอ่านของมนุษย์ได้ดีกว่าการใช้ตรรกแบบอื่นๆ ดังนั้นจึงอาจนำไปใช้ในการวิเคราะห์ระบบที่มีความสลับซับซ้อนมากๆ ได้ดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการใช้งานกับระบบที่ไม่อาจหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีการแบบธรรมดา (conventional) ได้ หรืออาจจะหาได้แต่ก็มีความยุ่งยากมาก ในการวิเคราะห์และแก้ไขปัญหาเกี่ยวกับระบบที่มีความซับซ้อนมากโดยอาศัยคณิตศาสตร์แบบฟuzzy นั้น ในการดำเนินงานจะใช้ตัวแปรทางภาษา (linguistic variable) แทนการใช้ตัวเลข (numerical variable) โดยทำการบ่งบอกลักษณะความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนต่างๆ ด้วย ฟuzzyอัลกอริทึม (fuzzy algorithm)

ตัวแปรทางภาษา หมายถึง ตัวแปรที่มีการให้ค่าเป็นคำหรือประโยค ตัวแปรดังกล่าวบ่งบอกลักษณะของสิ่งของใดๆ ซึ่งมีค่าตามค่าให้ค่าของฟuzzyเซต และตัวแปรทางภาษานั้นก็คือตัวแปรฟuzzyนั่นเอง ตัวแปรทางภาษาได้รับการนำมาใช้บ่งบอกความสัมพันธ์ระหว่างสถานะต่างๆ ในระบบพลวัต โดยแสดงความสัมพันธ์ในรูปประโยคฟuzzy ซึ่งมีลักษณะเป็นประโยคเงื่อนไข ถ้า...แล้ว... (if...then...) หรืออาจจะเรียกประโยคเงื่อนไขเหล่านี้ว่ากฎ (rules) โดยเมื่อนำประโยคเงื่อนไขหลายๆ ประโยคมาร้อยเรียงกันอย่างมีระเบียบ มีขั้นตอน และผูกพันกันด้วยตรรก สิ่งที่ได้

เราเรียกว่าฟuzzyอัลกอริทึม ซึ่งเป็นหัวใจสำคัญของการโปรแกรมคอมพิวเตอร์ อย่างไรก็ตาม ในมุมมองที่กว้างขึ้นนั้น ฟuzzyอัลกอริทึมอาจมีทั้งตัวแปรธรรมดาและตัวแปรทางภาษาปะปนคละกันอยู่ได้

เมื่อกล่าวถึงระบบควบคุมแบบฟuzzy (สราวดี, 2538) ในปัจจุบันจะหมายถึงระบบควบคุมที่มีการใช้ตัวควบคุมแบบฟuzzyลอจิก (fuzzy logic controller) หรือที่เรียกโดยย่อว่า FLC ภาพที่ 6.3 แสดงลักษณะพื้นฐานของระบบควบคุมแบบฟuzzy ซึ่งจะเห็นว่าตัวควบคุมแบบฟuzzyหรือ FLC มีองค์ประกอบหลักอยู่ 4 ส่วน ได้แก่ ชุดปฏิบัติการฟuzzyฟิเคชั่น (fuzzification unit) ฐานความรู้ (knowledge base) ลอจิกเพื่อการตัดสินใจ (decision making logic) และชุดปฏิบัติการดีฟuzzyฟิเคชั่น (defuzzification unit)



ภาพที่ 6.3 ลักษณะพื้นฐานของระบบควบคุมแบบฟuzzy

- ชุดปฏิบัติการฟuzzyฟิเคชั่น ทำหน้าที่แปลงสัญญาณข้อมูลแบบธรรมดาให้ไปอยู่ในรูปของตัวแปรภาษาหรือตัวแปรฟuzzy ซึ่งเป็นการแปลงข้อมูลทางด้านอินพุต บางครั้งอาจพบว่า เมื่อกล่าวถึงชุดปฏิบัติการฟuzzyฟิเคชั่น ผู้พูดหมายรวมเอาชุดวัดสัญญาณด้วยทรานสดิวเซอร์และชุดเปรียบเทียบสัญญาณไว้ในส่วนที่เป็นชุดปฏิบัติการฟuzzyฟิเคชั่นนี้ด้วย

- ฐานความรู้ จะประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นฐานข้อมูล (data base) และฐานกฎการควบคุม (control rule base) ส่วนที่เป็นฐานข้อมูลนั้นให้นิยามต่างๆ ที่ใช้กำหนดกฎการควบคุมนั้น เป็นศูนย์รวมของกฎการควบคุมแบบตัวแปรทางภาษา ซึ่งแสดงถึงแนวทางการควบคุมให้ระบบมีพฤติกรรมตามต้องการ

- ลอจิกเพื่อการตัดสินใจ เป็นส่วนที่ทำให้การเลียนแบบการตัดสินใจของมนุษย์ โดยอาศัยแนวคิดทางคณิตศาสตร์และการอนุมานแบบฟuzzy (fuzzy inference)

- ชุดปฏิบัติการดีฟัซซิฟิเคชัน ทำหน้าที่แปลงข้อมูลแบบฟัซซีไปเป็นตัวแปรแบบธรรมดา (conventional variable) ที่สมนัยกัน เพื่อให้ระบบภายใต้การควบคุมสามารถเข้าใจสัญญาณดังกล่าวได้ ข้อมูลแบบฟัซซีที่กล่าวถึงข้างต้นเป็นข้อมูลที่ได้จากการอนุมานกฎการควบคุมแบบฟัซซีต่างๆ

การทำงานภายใน FLC อาศัยคณิตศาสตร์แบบฟัซซีและตัวแปรแบบฟัซซีทั้งสิ้น เมื่อ FLC จะต้องเกี่ยวข้องกับระบบทางกายภาพที่ไม่เป็นฟัซซี ตัวแปรต่างๆ ที่ไม่เป็นฟัซซี ได้แก่ เอาต์พุตของกระบวนการหรือระบบภายใต้การควบคุม อินพุตอ้างอิง เป็นต้น จะต้องผ่านกระบวนการทำให้เป็นฟัซซีที่เรียกว่า ฟัซซิฟายเออร์ (fuzzifier) ผลของการอนุมานที่ได้จาก FLC ซึ่งจะนำไปบังคับควบคุมกระบวนการอยู่ในรูปของตัวแปรฟัซซี ซึ่งระบบหรือกระบวนการภายใต้การควบคุมนั้นไม่สามารถเข้าใจได้ ตัวแปรฟัซซีดังกล่าวจึงต้องผ่านกระบวนการทำให้ไม่เป็นฟัซซีที่เรียกว่า ดีฟัซซิฟายเออร์ (defuzzifier)

6.3 การออกแบบตัวควบคุมกำกับสั่งการด้วยตรรกศาสตร์ฟัซซีเพื่อการประหยัดพลังงาน

จากการศึกษาพลวัตทางพลังงานของระบบอย่างละเอียด โดยอาศัยโปรแกรมจำลองผลระบบดังที่ได้นำเสนอในบทที่ 5 ที่ผ่านมา ทำให้ทราบว่า บางกรณีแผงพีวีมีพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้มากเกินไปเกินความต้องการของมอเตอร์และแบตเตอรี่ และบางกรณีการชาร์จแบตเตอรี่ก็ทำได้ไม่เสร็จสิ้นสมบูรณ์ ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากการชาร์จแบตเตอรี่ทั้ง 50 ลูก มีรูปแบบการชาร์จที่ตายตัว โดยจะต้องนำแบตเตอรี่ซึ่งมีทั้งหมด 5 ชุด เข้าชาร์จทีละชุด ซึ่งแต่ละชุดประกอบด้วยแบตเตอรี่ 10 ลูก ต่ออนุกรมกันอยู่ ซึ่งในความเป็นจริง การใช้พลังงานจากแผงพีวีให้ได้ประโยชน์มากที่สุดนั้น ผู้ใช้ระบบสามารถดำเนินการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการชาร์จของแบตเตอรี่เสียใหม่ได้ตามความสามารถและความชาญฉลาดของมนุษย์ในการจัดการพลังงาน โดยอาจได้รับการนำไปอนุวัติขึ้นเป็นตัวควบคุมการจัดการพลังงานได้

ตัวควบคุมกำกับสั่งการแบบฟัซซีที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ จะทำหน้าที่เฝ้าตรวจสอบสถานะทางพลังงานเอาต์พุตของแผงพีวี แล้วดำเนินการตัดสินใจสั่งการสวิทช์ถ่ายโอนพลังงานให้แก่อุปกรณ์ต่างๆ อย่างเหมาะสม ซึ่งการออกแบบฐานกฎของตัวควบคุมนี้จะดำเนินการตามแนวอติวิสัย ที่อาศัยการศึกษาวิเคราะห์ผลจากการจำลองสถานการณ์บนรากฐานความเข้าใจด้านพลวัตทางพลังงานของระบบ โดยจะสังเกตเห็นว่าปัญหาในการชาร์จแบตเตอรี่ได้ไม่สมบูรณ์มาจากสาเหตุสำคัญประการหนึ่งคือ ช่วงการชาร์จแบบ CVC สำหรับแบตเตอรี่แต่ละชุดที่มี 10 ลูก อนุกรมกันนั้น ต้องการแรงดันไฟฟ้าสูงถึง 141 V คงที่ตลอดทั้งช่วง ซึ่งการแก้ไขปัญหานี้ อาจทำได้โดยการจัดแบตเตอรี่ให้เข้าชาร์จทีละลูก ตามจังหวะเวลาที่เหมาะสมและสอดคล้องกับพลังงานที่ได้จากแผงพีวี

การออกแบบตัวควบคุมแบบพีซีในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ จะประกอบไปด้วย องค์ประกอบหลักๆ อยู่ 4 ส่วน ส่วนแรกได้แก่ฐานความรู้ ซึ่งจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับ 3 ส่วนที่เหลือได้แก่ ชุดปฏิบัติการพีซีพีเคชั่น ลอจิกเพื่อให้เกิดการตัดสินใจ และชุดปฏิบัติการดีพีซีพีเคชั่น โดยส่วนแรกที่เป็นฐานความรู้ จะประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นฐานข้อมูลและฐานกฎการควบคุม ซึ่งส่วนที่เป็นฐานข้อมูล จะให้นิยามต่างๆ ที่ใช้กำหนดกฎการควบคุมนั้น โดยสามารถแสดงการออกแบบฐานกฎอย่างกว้างๆ เพื่อให้เห็นถึงลักษณะการทำงานของตัวควบคุมโดยรวมของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ ได้ดังนี้

ถ้า [พลังงานจากแผงพีวีไม่เพียงพอที่จะขับมอเตอร์ และพลังงานจากแบตเตอรี่ไม่เพียงพอสำหรับใช้งาน] แล้ว

[ให้อายุคเดินระบบ]

ถ้า [พลังงานจากแผงพีวีไม่เพียงพอที่จะขับมอเตอร์] แล้ว

[ให้อายุครับพลังงานจากแบตเตอรี่]

ถ้า [พลังงานจากแผงพีวีมีเพียงพอที่จะขับมอเตอร์] แล้ว

[ให้อายุคพลังงานจากแผงพีวีขับมอเตอร์ก่อนเป็นลำดับความสำคัญแรก]

ถ้า [ใช้พลังงานจากแผงพีวีขับมอเตอร์อยู่ และคงมีพลังงานส่วนเกิน] แล้ว

{ - ให้อายุคทำนายว่าค่ากระแสและแรงดันจากแผงพีวีมีค่าเพียงพอที่จะชาร์จแบตเตอรี่ได้ ก็ถูกอนุกรม, ก็ถูกขนานหรือก็ถูกผสมทั้งอนุกรมและขนานด้วยจำนวนลูกมากที่สุด และบันทึกสถานภาพการเข้าชาร์จของแบตเตอรี่

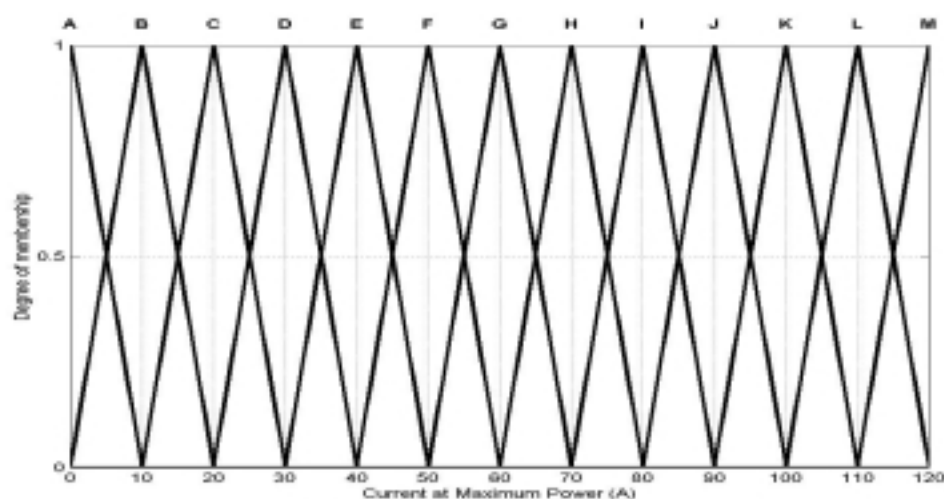
- ให้อายุคทำนายว่าจะเพิ่มจำนวนของแบตเตอรี่เข้าชาร์จได้หรือไม่ และบันทึกสถานภาพเมื่อเพิ่มแบตเตอรี่เข้าชาร์จ

- ให้อายุคทำนายว่าแบตเตอรี่ชุดใดชาร์จเสร็จสิ้นสมบูรณ์แล้ว ให้อายุคปลดออก และบันทึกสถานภาพของแบตเตอรี่

- ให้อายุคทำนายว่าหากพลังงานจากแผงพีวีลดลงจนมีผลต่อการชาร์จ ให้อายุคพิจารณาปลดชุดแบตเตอรี่ออกจากการชาร์จที่ละชุด โดยชุดที่เข้าชาร์จที่หลังจะถูกปลดก่อน และบันทึกสถานภาพของแบตเตอรี่ }

ในภาพรวมของการออกแบบฐานกฎการควบคุมอย่างกว้างๆ ข้างต้นนี้ เป็นการพยายามจัดแบตเตอรี่เข้าชาร์จ เพื่อดึงพลังงานจากแผงฟิวดิวมาใช้ประโยชน์ให้มากที่สุด โดยเน้นที่การจัดให้มีการนำแบตเตอรี่เข้าชาร์จได้ที่ละลูกตามค่ากระแสและแรงดันจากแผงฟิวดิวที่สอดคล้อง ซึ่งสามารถนำแบตเตอรี่เข้าชาร์จได้ทั้งแบบอนุกรม แบบขนาน หรือแบบผสมทั้งอนุกรมและขนาน ด้วยปริมาณลูกของแบตเตอรี่มากที่สุด

ฐานข้อมูล ที่ต้องคำนึงถึงในการกำหนดกฎการควบคุมของงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ เริ่มจากการเลือกตัวแปรอินพุตและตัวแปรเอาต์พุตที่สอดคล้องกับกฎการควบคุมให้ครบถ้วน และดำเนินการกำหนดลักษณะของฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพขึ้น โดยการกำหนดฟังก์ชันความเป็นสมาชิกให้เหมาะสมจะส่งให้การอนุมานผลตอบของระบบฟัซซี่มีผลดีขึ้น ซึ่งรูปแบบของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่ยอมรับและใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ ฟังก์ชันรูปสามเหลี่ยม เนื่องจากฟังก์ชันนี้มีความชัดเจนในการให้จุดสูงสุดเพียงแค่จุดเดียว โดยภาพที่ 6.4 เป็นการแสดงฟังก์ชันสมาชิกภาพของกระแสที่ทำให้เกิดกำลังงานสูงสุดที่ผลิตได้จากแผงฟิวดิว ($I_{P_{max}}$) ซึ่งเป็นตัวแปรอินพุตตัวหนึ่งที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ รูปแบบของฟังก์ชันเป็นรูปสามเหลี่ยมที่เกิดจากการดำเนินการตามแนวอัตรวิสัยที่อาศัยการศึกษาและวิเคราะห์ผลจากการจำลองผลของระบบ โดยมีช่วงอินพุตที่เหมาะสมและสอดคล้องกับการแบ่งส่วนของตัวแปรทางภาษาอยู่ระหว่าง 0-120 A อักษรย่อต่างๆ ที่ปรากฏในภาพที่ 6.4 คือตัวแปรทางภาษาที่เกิดขึ้นจากกระบวนการทำให้เป็นฟัซซี่หรือที่เรียกว่า กระบวนการฟัซซี่ฟิเคชัน โดยตัวแปรทางภาษาเหล่านี้ จะใช้ร่วมกันกับอินพุตตัวอื่นๆ ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ด้วย ซึ่งมีความหมายแสดงค่าเป็นคำหรือประโยค ได้ดังต่อไปนี้



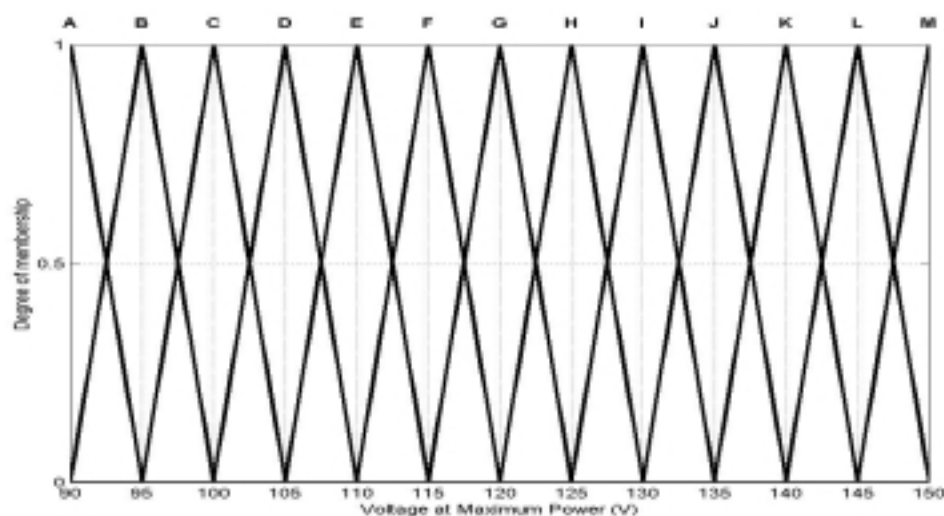
ภาพที่ 6.4 ฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพของกระแสที่ผลิตได้จากแผงฟิวดิว

A	=	ปริมาณ กระแส/แรงดัน ที่มีค่าต่ำที่สุด
B	=	ปริมาณ กระแส/แรงดัน ที่มีค่าต่ำมาก
C	=	ปริมาณ กระแส/แรงดัน ที่มีค่าต่ำค่อนข้างไปทางต่ำมาก
D	=	ปริมาณ กระแส/แรงดัน ที่มีค่าต่ำ
E	=	ปริมาณ กระแส/แรงดัน ที่มีค่าค่อนข้างต่ำ
F	=	ปริมาณ กระแส/แรงดัน ที่มีค่าค่อนข้างต่ำไปทางปานกลาง
G	=	ปริมาณ กระแส/แรงดัน ที่มีค่าปานกลาง
H	=	ปริมาณ กระแส/แรงดัน ที่มีค่าค่อนข้างสูงไปทางปานกลาง
I	=	ปริมาณ กระแส/แรงดัน ที่มีค่าค่อนข้างสูง
J	=	ปริมาณ กระแส/แรงดัน ที่มีค่าสูง
K	=	ปริมาณ กระแส/แรงดัน ที่มีค่าสูงค่อนข้างไปทางสูงมาก
L	=	ปริมาณ กระแส/แรงดัน ที่มีค่าสูงมาก
M	=	ปริมาณ กระแส/แรงดัน ที่มีค่าสูงที่สุด

จากภาพที่ 6.4 วิธีการฟิชชี่ฟิเคชั่นจะดำเนินการโดยพิจารณาย่านของเอกภพสัมพัทธ์ที่สอดคล้องกับจุดตัดข้าม (crossover point) ที่มีค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 0.5 ดังนั้นการฟิชชี่ฟิเคชั่นเพื่อบ่งบอกปริมาณกระแสที่ผลิตได้จากแผงฟิว จึงสรุปรวมได้ดังต่อไปนี้

A	คือ	$I_{Pmax} < 5 A$
B	คือ	$5 A \leq I_{Pmax} < 15 A$
C	คือ	$15 A \leq I_{Pmax} < 25 A$
D	คือ	$25 A \leq I_{Pmax} < 35 A$
E	คือ	$35 A \leq I_{Pmax} < 45 A$
F	คือ	$45 A \leq I_{Pmax} < 55 A$
G	คือ	$55 A \leq I_{Pmax} < 65 A$
H	คือ	$65 A \leq I_{Pmax} < 75 A$
I	คือ	$75 A \leq I_{Pmax} < 85 A$
J	คือ	$85 A \leq I_{Pmax} < 95 A$
K	คือ	$95 A \leq I_{Pmax} < 105 A$
L	คือ	$105 A \leq I_{Pmax} < 115 A$
M	คือ	$I_{Pmax} \geq 115 A$

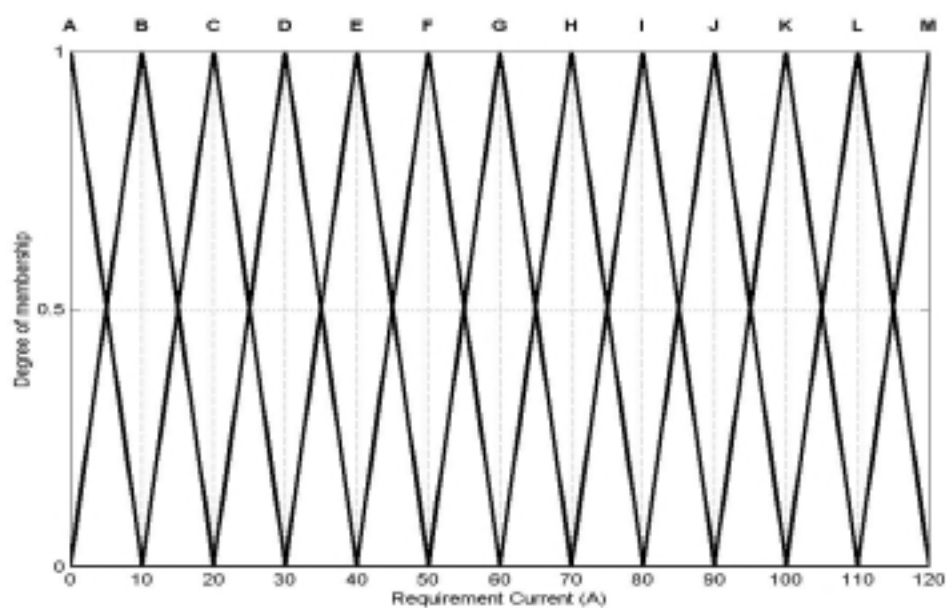
ตัวแปรอินพุตตัวถัดมาที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมนี้ก็คือ แรงดันที่ทำให้เกิดกำลังงานสูงสุดที่ผลิตได้จากแผงพีวี (V_{Pmax}) ซึ่งสามารถแสดงฟังก์ชันสมาชิกภาพได้ดังภาพที่ 6.5 โดยเป็นฟังก์ชันรูปสามเหลี่ยมเช่นกัน มีค่าแรงดันที่เหมาะสมและสอดคล้องกับการแบ่งส่วนของตัวแปรทางภาษาอยู่ในช่วง 90-150 V วิธีการฟัซซีฟิเคชันพิจารณาย่านของเอกภพสัมพัทธ์ที่สอดคล้องกับจุดตัดข้ามที่มีค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 0.5 ดังนั้นการฟัซซีฟิเคชันเพื่อบ่งบอกปริมาณแรงดันที่ผลิตได้จากแผงพีวี จึงสรุปรวมได้ดังต่อไปนี้



ภาพที่ 6.5 ฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพของแรงดันที่ผลิตได้จากแผงพีวี

A	คือ	V_{Pmax}	<	92.5 V
B	คือ	92.5 V	\leq	V_{Pmax} < 97.5 V
C	คือ	97.5 V	\leq	V_{Pmax} < 102.5 V
D	คือ	102.5 V	\leq	V_{Pmax} < 107.5 V
E	คือ	107.5 V	\leq	V_{Pmax} < 112.5 V
F	คือ	112.5 V	\leq	V_{Pmax} < 117.5 V
G	คือ	117.5 V	\leq	V_{Pmax} < 122.5 V
H	คือ	122.5 V	\leq	V_{Pmax} < 127.5 V
I	คือ	127.5 V	\leq	V_{Pmax} < 132.5 V
J	คือ	132.5 V	\leq	V_{Pmax} < 137.5 V
K	คือ	137.5 V	\leq	V_{Pmax} < 142.5 V
L	คือ	142.5 V	\leq	V_{Pmax} < 147.5 V
M	คือ	V_{Pmax}	\geq	147.5 V

และตัวแปรอินพุตตัวสุดท้ายที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมนี้ได้แก่ ปริมาณกระแสที่มอเตอร์และแบตเตอรี่ต้องการ (I_{req}) ซึ่งตัวแปรอินพุตตัวนี้ อาจนำไปใช้เพียงแค่บางอัลกอริทึมที่นำไปสู่ผลตอบนั้นๆ ของระบบเท่านั้น ซึ่งจะมีฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพเหมือนกับตัวแปรอินพุต I_{pmax} ในข้างต้น โดยสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 6.6 ดังนั้นรายละเอียดต่างๆ ของตัวแปรอินพุตตัวนี้ จึงจะไม่ขอกล่าวซ้ำอีก



ภาพที่ 6.6 ฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพของกระแสที่มอเตอร์และแบตเตอรี่ต้องการ

ส่วนตัวแปรเอาต์พุตที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมนี้ จะประกอบด้วยตัวแปรหลักเพียงหนึ่งตัวแปรเท่านั้น อันได้แก่ปริมาณแบตเตอรี่ต่อชุดที่ใช้ในการชาร์จ ซึ่งจากการศึกษาพลวัตทางพลังงานของระบบจากบทที่ผ่านมาทำให้ทราบว่า ฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพสำหรับปริมาณแบตเตอรี่ต่อชุดจะมีค่าแคบๆ อยู่ระหว่าง 8-10 ลูกเท่านั้น ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจาก ตลอดระยะเวลาทั้งวันที่มีแสง แรงดันที่ผลิตได้จากแผงพีวีที่ค่าความเข้มแสงอาทิตย์คิดเป็นร้อยละของวันที่ฟ้าเปิดในช่วง 50-100 % จะมีค่าแรงดันต่ำสุดเพียงพอในการเริ่มต้นชาร์จแบตเตอรี่ได้สูงถึง 8 ลูกต่อชุด และจะมีค่าแรงดันสูงสุดในการชาร์จแบตเตอรี่ได้ไม่เกิน 10 ลูกต่อชุดเท่านั้น ดังนั้นจึงสามารถแสดงตัวแปรทางภาษาที่เกิดขึ้นจากระบวนการฟัซซีฟิเคชัน ที่มีความหมายแสดงค่าเป็นคำหรือประโยคได้ดังต่อไปนี้

SG (Small Group) = ปริมาณแบตเตอรี่ต่อชุดที่มีค่าน้อย

MG(Medium Group)= ปริมาณแบตเตอรี่ต่อชุดที่มีค่าปานกลาง

LG(Large Group) = ปริมาณแบตเตอรี่ต่อชุดที่มีค่ามาก

เนื่องจากปริมาณแบตเตอรี่ต่อชุดจะต้องมีค่าเป็นจำนวนเต็มบวกเท่านั้น ดังนั้นเราจึงอาจสรุปกระบวนการแปลงข้อมูลแบบพีชชีกลับไปเป็นตัวแปรแบบธรรมดาหรือที่เรียกว่ากระบวนการดีพีชชีพีเคชัน เพื่อหาค่าเอาต์พุตออกมาได้ว่า

SG คือ แบตเตอรี่มีจำนวน 8 ลูกต่อชุด

MG คือ แบตเตอรี่มีจำนวน 9 ลูกต่อชุด

LG คือ แบตเตอรี่มีจำนวน 10 ลูกต่อชุด

เมื่อตัวควบคุมมีฐานข้อมูลที่ใช้ในการออกแบบครบถ้วนแล้ว จากนั้นก็ดำเนินการสังเคราะห์พีชชีอัลกอริทึม ซึ่งเกิดจากการนำประโยคเงื่อนไขหรือกฎหลายๆ กฎมาร้อยเรียงกันอย่างมีระเบียบมีขั้นตอนและผูกพันกันด้วยตรรก หรือที่เรียกว่า ลอจิกเพื่อให้การตัดสินใจ ซึ่งเป็นส่วนที่ให้การเลียนแบบการตัดสินใจของมนุษย์ โดยในที่นี้จะต้องคำนึงถึง การตีความของคำเชื่อมประโยคแบบ "และ" และแบบ "หรือ" ซึ่งพีชชีอัลกอริทึมของระบบพลังงานผสมผสานในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ สังเคราะห์ขึ้นตามแนวทางศึกษาสำนัก โดยเมื่อแบ่งตามผลตอบของระบบจะมีด้วยกันทั้งหมด 9 อัลกอริทึม ถึงจะครอบคลุมทุกๆ ผลตอบเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ยังไม่มีตัวควบคุม ซึ่งอัลกอริทึมทั้ง 9 นี้ จะมีทั้งตัวแปรธรรมดาและตัวแปรทางภาษาปะปนคละกัน โดยจะประกอบไปด้วยกฎทั้งหมด 55 กฎ ดังนี้

- อัลกอริทึมที่เกี่ยวกับมอเตอร์รับพลังงานจากแผงพีวี

1. ถ้า $[I_{P_{max}}$ เป็น C, D, E, F, G, H, I, J, K, L หรือ M] และ $[V_{P_{max}}$ เป็น F, G, H, I, J, K, L หรือ M] แล้ว

[มอเตอร์รับพลังงานจากแผงพีวี]

- อัลกอริทึมที่เกี่ยวกับการชาร์จแบตเตอรี่ชุดที่ 1

2. ถ้า $[I_{P_{max}}$ เป็น D] และ $[V_{P_{max}}$ เป็น F, G หรือ H] แล้ว

[แบตเตอรี่ชุดที่ 1 เข้าชาร์จด้วยปริมาณ SG แบบอนุกรม]

3. ถ้า $[I_{P_{max}}$ เป็น D] และ $[V_{P_{max}}$ เป็น I, J หรือ K] แล้ว

[แบตเตอรี่ชุดที่ 1 เข้าชาร์จด้วยปริมาณ MG แบบอนุกรม]

4. ถ้า $[I_{P_{max}}$ เป็น D] และ $[V_{P_{max}}$ เป็น L หรือ M] แล้ว
 [แบตเตอรี่ชุดที่ 1 เข้าชาร์จด้วยปริมาณ LG แบบอนุกรม]
- อัลกอริทึมที่เกี่ยวกับการชาร์จแบตเตอรี่ชุดที่ 2
- ถ้า (แบตเตอรี่ชุดที่ 1 ถูกชาร์จ และ $t \leq \text{fitimeccc}(1)$) แล้ว {
5. ถ้า $[I_{P_{max}}$ เป็น F] และ $[V_{P_{max}}$ เป็น F, G หรือ H] แล้ว
 [แบตเตอรี่ชุดที่ 2 เข้าชาร์จด้วยปริมาณ SG แบบอนุกรม]
6. ถ้า $[I_{P_{max}}$ เป็น F] และ $[V_{P_{max}}$ เป็น I, J หรือ K] แล้ว
 [แบตเตอรี่ชุดที่ 2 เข้าชาร์จด้วยปริมาณ MG แบบอนุกรม]
7. ถ้า $[I_{P_{max}}$ เป็น F] และ $[V_{P_{max}}$ เป็น L หรือ M] แล้ว
 [แบตเตอรี่ชุดที่ 2 เข้าชาร์จด้วยปริมาณ LG แบบอนุกรม] }
- ถ้า (แบตเตอรี่ชุดที่ 1 ถูกชาร์จ และ $t > \text{fitimeccc}(1)$) แล้ว {
8. ถ้า $[I_{P_{max}}$ เป็น D, E หรือ F] และ $[I_{req}$ เป็นเหมือน $I_{P_{max}}$] และ $[V_{P_{max}}$ เป็น F, G หรือ H] แล้ว
 [แบตเตอรี่ชุดที่ 2 เข้าชาร์จด้วยปริมาณ SG แบบอนุกรม]
9. ถ้า $[I_{P_{max}}$ เป็น D, E หรือ F] และ $[I_{req}$ เป็นเหมือน $I_{P_{max}}$] และ $[V_{P_{max}}$ เป็น I, J หรือ K] แล้ว
 [แบตเตอรี่ชุดที่ 2 เข้าชาร์จด้วยปริมาณ MG แบบอนุกรม]
10. ถ้า $[I_{P_{max}}$ เป็น D, E หรือ F] และ $[I_{req}$ เป็นเหมือน $I_{P_{max}}$] และ $[V_{P_{max}}$ เป็น L หรือ M] แล้ว
 [แบตเตอรี่ชุดที่ 2 เข้าชาร์จด้วยปริมาณ LG แบบอนุกรม] }
- อัลกอริทึมที่เกี่ยวกับการชาร์จแบตเตอรี่ชุดที่ 3
- ถ้า (แบตเตอรี่ชุดที่ 2 ถูกชาร์จ และ $t \leq \text{fitimeccc}(1)$) แล้ว {
11. ถ้า $[I_{P_{max}}$ เป็น H] และ $[V_{P_{max}}$ เป็น F, G หรือ H] แล้ว
 [แบตเตอรี่ชุดที่ 3 เข้าชาร์จด้วยปริมาณ SG แบบอนุกรม]
12. ถ้า $[I_{P_{max}}$ เป็น H] และ $[V_{P_{max}}$ เป็น I, J หรือ K] แล้ว
 [แบตเตอรี่ชุดที่ 3 เข้าชาร์จด้วยปริมาณ MG แบบอนุกรม]
13. ถ้า $[I_{P_{max}}$ เป็น H] และ $[V_{P_{max}}$ เป็น L หรือ M] แล้ว
 [แบตเตอรี่ชุดที่ 3 เข้าชาร์จด้วยปริมาณ LG แบบอนุกรม] }
- ถ้า (แบตเตอรี่ชุดที่ 2 ถูกชาร์จ และ $\text{fitimeccc}(1) < t \leq \text{fitimeccc}(2)$) แล้ว {
14. ถ้า $[I_{P_{max}}$ เป็น F, G หรือ H] และ $[I_{req}$ เป็นเหมือน $I_{P_{max}}$] และ $[V_{P_{max}}$ เป็น F, G หรือ H] แล้ว
 [แบตเตอรี่ชุดที่ 3 เข้าชาร์จด้วยปริมาณ SG แบบอนุกรม]

15. ถ้า $[I_{P_{max}}$ เป็น F, G หรือ H] และ $[I_{req}$ เป็นเหมือน $I_{P_{max}}$] และ $[V_{P_{max}}$ เป็น I, J หรือ K] แล้ว
 [แบตเตอรี่ชุดที่ 3 เข้าชาร์จด้วยปริมาณ MG แบบอนุกรม]
16. ถ้า $[I_{P_{max}}$ เป็น F, G หรือ H] และ $[I_{req}$ เป็นเหมือน $I_{P_{max}}$] และ $[V_{P_{max}}$ เป็น L หรือ M] แล้ว
 [แบตเตอรี่ชุดที่ 3 เข้าชาร์จด้วยปริมาณ LG แบบอนุกรม] }
- ถ้า (แบตเตอรี่ชุดที่ 2 ถูกชาร์จ และ $t > \text{fitimecccc}(2)$) แล้ว {
17. ถ้า $[I_{P_{max}}$ เป็น D, E, F, G หรือ H] และ $[I_{req}$ เป็นเหมือน $I_{P_{max}}$] และ $[V_{P_{max}}$ เป็น F, G หรือ H]
 แล้ว
 [แบตเตอรี่ชุดที่ 3 เข้าชาร์จด้วยปริมาณ SG แบบอนุกรม]
18. ถ้า $[I_{P_{max}}$ เป็น D, E, F, G หรือ H] และ $[I_{req}$ เป็นเหมือน $I_{P_{max}}$] และ $[V_{P_{max}}$ เป็น I, J หรือ K]
 แล้ว
 [แบตเตอรี่ชุดที่ 3 เข้าชาร์จด้วยปริมาณ MG แบบอนุกรม]
19. ถ้า $[I_{P_{max}}$ เป็น D, E, F, G หรือ H] และ $[I_{req}$ เป็นเหมือน $I_{P_{max}}$] และ $[V_{P_{max}}$ เป็น L หรือ M] แล้ว
 [แบตเตอรี่ชุดที่ 3 เข้าชาร์จด้วยปริมาณ LG แบบอนุกรม] }
- อัลกอริทึมที่เกี่ยวกับการชาร์จแบตเตอรี่ชุดที่ 4
- ถ้า (แบตเตอรี่ชุดที่ 3 ถูกชาร์จ และ $t \leq \text{fitimecccc}(1)$) แล้ว {
20. ถ้า $[I_{P_{max}}$ เป็น I] และ $[V_{P_{max}}$ เป็น F, G หรือ H] แล้ว
 [แบตเตอรี่ชุดที่ 4 เข้าชาร์จด้วยปริมาณ SG แบบอนุกรม]
21. ถ้า $[I_{P_{max}}$ เป็น I] และ $[V_{P_{max}}$ เป็น I, J หรือ K] แล้ว
 [แบตเตอรี่ชุดที่ 4 เข้าชาร์จด้วยปริมาณ MG แบบอนุกรม]
22. ถ้า $[I_{P_{max}}$ เป็น I] และ $[V_{P_{max}}$ เป็น L หรือ M] แล้ว
 [แบตเตอรี่ชุดที่ 4 เข้าชาร์จด้วยปริมาณ LG แบบอนุกรม] }
- ถ้า (แบตเตอรี่ชุดที่ 3 ถูกชาร์จ และ $\text{fitimecccc}(1) < t \leq \text{fitimecccc}(2)$) แล้ว {
23. ถ้า $[I_{P_{max}}$ เป็น H หรือ I] และ $[I_{req}$ เป็นเหมือน $I_{P_{max}}$] และ $[V_{P_{max}}$ เป็น F, G หรือ H] แล้ว
 [แบตเตอรี่ชุดที่ 4 เข้าชาร์จด้วยปริมาณ SG แบบอนุกรม]
24. ถ้า $[I_{P_{max}}$ เป็น H หรือ I] และ $[I_{req}$ เป็นเหมือน $I_{P_{max}}$] และ $[V_{P_{max}}$ เป็น I, J หรือ K] แล้ว
 [แบตเตอรี่ชุดที่ 4 เข้าชาร์จด้วยปริมาณ MG แบบอนุกรม]
25. ถ้า $[I_{P_{max}}$ เป็น H หรือ I] และ $[I_{req}$ เป็นเหมือน $I_{P_{max}}$] และ $[V_{P_{max}}$ เป็น L หรือ M] แล้ว
 [แบตเตอรี่ชุดที่ 4 เข้าชาร์จด้วยปริมาณ LG แบบอนุกรม] }

ถ้า (แบตเตอรี่ชุดที่ 3 ถูกชาร์จ และ $\text{fitimeccc}(2) < t \leq \text{fitimeccc}(3)$) แล้ว {

26. ถ้า $[I_{P_{\max}}$ เป็น F, G, H หรือ I] และ $[I_{\text{req}}$ เป็นเหมือน $I_{P_{\max}}$] และ $[V_{P_{\max}}$ เป็น F, G หรือ H] แล้ว

[แบตเตอรี่ชุดที่ 4 เข้าชาร์จด้วยปริมาณ SG แบบอนุกรม]

27. ถ้า $[I_{P_{\max}}$ เป็น F, G, H หรือ I] และ $[I_{\text{req}}$ เป็นเหมือน $I_{P_{\max}}$] และ $[V_{P_{\max}}$ เป็น I, J หรือ K] แล้ว

[แบตเตอรี่ชุดที่ 4 เข้าชาร์จด้วยปริมาณ MG แบบอนุกรม]

28. ถ้า $[I_{P_{\max}}$ เป็น F, G, H หรือ I] และ $[I_{\text{req}}$ เป็นเหมือน $I_{P_{\max}}$] และ $[V_{P_{\max}}$ เป็น L หรือ M] แล้ว

[แบตเตอรี่ชุดที่ 4 เข้าชาร์จด้วยปริมาณ LG แบบอนุกรม] }

ถ้า (แบตเตอรี่ชุดที่ 3 ถูกชาร์จ และ $t > \text{fitimeccc}(3)$) แล้ว {

29. ถ้า $[I_{P_{\max}}$ เป็น D, E, F, G, H หรือ I] และ $[I_{\text{req}}$ เป็นเหมือน $I_{P_{\max}}$] และ $[V_{P_{\max}}$ เป็น F, G หรือ

H] แล้ว

[แบตเตอรี่ชุดที่ 4 เข้าชาร์จด้วยปริมาณ SG แบบอนุกรม]

30. ถ้า $[I_{P_{\max}}$ เป็น D, E, F, G, H หรือ I] และ $[I_{\text{req}}$ เป็นเหมือน $I_{P_{\max}}$] และ $[V_{P_{\max}}$ เป็น I, J หรือ K]

แล้ว

[แบตเตอรี่ชุดที่ 4 เข้าชาร์จด้วยปริมาณ MG แบบอนุกรม]

31. ถ้า $[I_{P_{\max}}$ เป็น D, E, F, G, H หรือ I] และ $[I_{\text{req}}$ เป็นเหมือน $I_{P_{\max}}$] และ $[V_{P_{\max}}$ เป็น L หรือ M]

แล้ว

[แบตเตอรี่ชุดที่ 4 เข้าชาร์จด้วยปริมาณ LG แบบอนุกรม] }

- อัลกอริทึมที่เกี่ยวข้องกับการชาร์จแบตเตอรี่ชุดที่ 5

ถ้า (แบตเตอรี่ชุดที่ 4 ถูกชาร์จ และ $t \leq \text{fitimeccc}(1)$) แล้ว {

32. ถ้า $[I_{P_{\max}}$ เป็น K] และ $[V_{P_{\max}}$ เป็น F, G หรือ H] แล้ว

[แบตเตอรี่ชุดที่ 5 เข้าชาร์จด้วยปริมาณ SG แบบอนุกรม]

33. ถ้า $[I_{P_{\max}}$ เป็น K] และ $[V_{P_{\max}}$ เป็น I, J หรือ K] แล้ว

[แบตเตอรี่ชุดที่ 5 เข้าชาร์จด้วยปริมาณ MG แบบอนุกรม]

34. ถ้า $[I_{P_{\max}}$ เป็น K] และ $[V_{P_{\max}}$ เป็น L หรือ M] แล้ว

[แบตเตอรี่ชุดที่ 5 เข้าชาร์จด้วยปริมาณ LG แบบอนุกรม] }

ถ้า (แบตเตอรี่ชุดที่ 4 ถูกชาร์จ และ $\text{fitimeccc}(1) < t \leq \text{fitimeccc}(2)$) แล้ว {

35. ถ้า $[I_{P_{\max}}$ เป็น I, J หรือ K] และ $[I_{\text{req}}$ เป็นเหมือน $I_{P_{\max}}$] และ $[V_{P_{\max}}$ เป็น F, G หรือ H] แล้ว

[แบตเตอรี่ชุดที่ 5 เข้าชาร์จด้วยปริมาณ SG แบบอนุกรม]

36. ถ้า $[I_{P_{max}}$ เป็น I, J หรือ K] และ $[I_{req}$ เป็นเหมือน $I_{P_{max}}$] และ $[V_{P_{max}}$ เป็น I, J หรือ K] แล้ว
 [แบตเตอรี่ชุดที่ 5 เข้าชาร์จด้วยปริมาณ MG แบบอนุกรม]
37. ถ้า $[I_{P_{max}}$ เป็น I, J หรือ K] และ $[I_{req}$ เป็นเหมือน $I_{P_{max}}$] และ $[V_{P_{max}}$ เป็น L หรือ M] แล้ว
 [แบตเตอรี่ชุดที่ 5 เข้าชาร์จด้วยปริมาณ LG แบบอนุกรม] }
- ถ้า (แบตเตอรี่ชุดที่ 4 ถูกชาร์จ และ $fitimecccc(2) < t \leq fitimecccc(3)$) แล้ว {
38. ถ้า $[I_{P_{max}}$ เป็น H, I, J หรือ K] และ $[I_{req}$ เป็นเหมือน $I_{P_{max}}$] และ $[V_{P_{max}}$ เป็น F, G หรือ H] แล้ว
 [แบตเตอรี่ชุดที่ 5 เข้าชาร์จด้วยปริมาณ SG แบบอนุกรม]
39. ถ้า $[I_{P_{max}}$ เป็น H, I, J หรือ K] และ $[I_{req}$ เป็นเหมือน $I_{P_{max}}$] และ $[V_{P_{max}}$ เป็น I, J หรือ K] แล้ว
 [แบตเตอรี่ชุดที่ 5 เข้าชาร์จด้วยปริมาณ MG แบบอนุกรม]
40. ถ้า $[I_{P_{max}}$ เป็น H, I, J หรือ K] และ $[I_{req}$ เป็นเหมือน $I_{P_{max}}$] และ $[V_{P_{max}}$ เป็น L หรือ M] แล้ว
 [แบตเตอรี่ชุดที่ 5 เข้าชาร์จด้วยปริมาณ LG แบบอนุกรม] }
- ถ้า (แบตเตอรี่ชุดที่ 4 ถูกชาร์จ และ $fitimecccc(3) < t \leq fitimecccc(4)$) แล้ว {
41. ถ้า $[I_{P_{max}}$ เป็น F, G, H, I, J หรือ K] และ $[I_{req}$ เป็นเหมือน $I_{P_{max}}$] และ $[V_{P_{max}}$ เป็น F, G หรือ H]
 แล้ว
 [แบตเตอรี่ชุดที่ 5 เข้าชาร์จด้วยปริมาณ SG แบบอนุกรม]
42. ถ้า $[I_{P_{max}}$ เป็น F, G, H, I, J หรือ K] และ $[I_{req}$ เป็นเหมือน $I_{P_{max}}$] และ $[V_{P_{max}}$ เป็น I, J หรือ K]
 แล้ว
 [แบตเตอรี่ชุดที่ 5 เข้าชาร์จด้วยปริมาณ MG แบบอนุกรม]
43. ถ้า $[I_{P_{max}}$ เป็น F, G, H, I, J หรือ K] และ $[I_{req}$ เป็นเหมือน $I_{P_{max}}$] และ $[V_{P_{max}}$ เป็น L หรือ M]
 แล้ว
 [แบตเตอรี่ชุดที่ 5 เข้าชาร์จด้วยปริมาณ LG แบบอนุกรม] }
- ถ้า (แบตเตอรี่ชุดที่ 4 ถูกชาร์จ และ $t > fitimecccc(4)$) แล้ว {
44. ถ้า $[I_{P_{max}}$ เป็น D, E, F, G, H, I, J หรือ K] และ $[I_{req}$ เป็นเหมือน $I_{P_{max}}$] และ $[V_{P_{max}}$ เป็น F, G
 หรือ H] แล้ว
 [แบตเตอรี่ชุดที่ 5 เข้าชาร์จด้วยปริมาณ SG แบบอนุกรม]
45. ถ้า $[I_{P_{max}}$ เป็น D, E, F, G, H, I, J หรือ K] และ $[I_{req}$ เป็นเหมือน $I_{P_{max}}$] และ $[V_{P_{max}}$ เป็น I, J หรือ
 K] แล้ว
 [แบตเตอรี่ชุดที่ 5 เข้าชาร์จด้วยปริมาณ MG แบบอนุกรม]

46. ถ้า $[I_{Pmax}$ เป็น D, E, F, G, H, I, J หรือ K] และ $[I_{req}$ เป็นเหมือน I_{Pmax}] และ $[V_{Pmax}$ เป็น L หรือ M] แล้ว

[แบตเตอรี่ชุดที่ 5 เข้าชาร์จด้วยปริมาณ LG แบบอนุกรม] }

- อัลกอริทึมที่เกี่ยวกับการชาร์จแบตเตอรี่ชุดที่ 6

47. ถ้า (แบตเตอรี่ชุดที่ 5 ถูกชาร์จ และ $t \leq \text{fitimeccc}(1)$) แล้ว {

ถ้า $[I_{Pmax}$ เป็น L] และ $[V_{Pmax}$ เป็น F, G, H, I, J, K, L หรือ M] แล้ว

[แบตเตอรี่ชุดที่ 6 เข้าชาร์จด้วยจำนวนเท่ากับแบตเตอรี่ที่เหลือแบบอนุกรม] }

48. ถ้า (แบตเตอรี่ชุดที่ 5 ถูกชาร์จ และ $\text{fitimeccc}(1) < t \leq \text{fitimeccc}(2)$) แล้ว {

ถ้า $[I_{Pmax}$ เป็น K หรือ L] และ $[I_{req}$ เป็นเหมือน I_{Pmax}] และ $[V_{Pmax}$ เป็น F, G, H, I, J, K, L หรือ M]

แล้ว

[แบตเตอรี่ชุดที่ 6 เข้าชาร์จด้วยจำนวนเท่ากับแบตเตอรี่ที่เหลือแบบอนุกรม] }

49. ถ้า (แบตเตอรี่ชุดที่ 5 ถูกชาร์จ และ $\text{fitimeccc}(2) < t \leq \text{fitimeccc}(3)$) แล้ว {

ถ้า $[I_{Pmax}$ เป็น I, J, K หรือ L] และ $[I_{req}$ เป็นเหมือน I_{Pmax}] และ $[V_{Pmax}$ เป็น F, G, H, I, J, K, L หรือ

M] แล้ว

[แบตเตอรี่ชุดที่ 6 เข้าชาร์จด้วยจำนวนเท่ากับแบตเตอรี่ที่เหลือแบบอนุกรม] }

50. ถ้า (แบตเตอรี่ชุดที่ 5 ถูกชาร์จ และ $\text{fitimeccc}(3) < t \leq \text{fitimeccc}(4)$) แล้ว {

ถ้า $[I_{Pmax}$ เป็น H, I, J, K หรือ L] และ $[I_{req}$ เป็นเหมือน I_{Pmax}] และ $[V_{Pmax}$ เป็น F, G, H, I, J, K, L

หรือ M] แล้ว

[แบตเตอรี่ชุดที่ 6 เข้าชาร์จด้วยจำนวนเท่ากับแบตเตอรี่ที่เหลือแบบอนุกรม] }

51. ถ้า (แบตเตอรี่ชุดที่ 5 ถูกชาร์จ และ $\text{fitimeccc}(4) < t \leq \text{fitimeccc}(5)$) แล้ว {

ถ้า $[I_{Pmax}$ เป็น F, G, H, I, J, K หรือ L] และ $[I_{req}$ เป็นเหมือน I_{Pmax}] และ $[V_{Pmax}$ เป็น F, G, H, I, J, K,

L หรือ M] แล้ว

[แบตเตอรี่ชุดที่ 6 เข้าชาร์จด้วยจำนวนเท่ากับแบตเตอรี่ที่เหลือแบบอนุกรม] }

52. ถ้า (แบตเตอรี่ชุดที่ 5 ถูกชาร์จ และ $t > \text{fitimeccc}(5)$) แล้ว {

ถ้า $[I_{Pmax}$ เป็น D, E, F, G, H, I, J, K หรือ L] และ $[I_{req}$ เป็นเหมือน I_{Pmax}] และ $[V_{Pmax}$ เป็น F, G, H,

I, J, K, L หรือ M] แล้ว

[แบตเตอรี่ชุดที่ 6 เข้าชาร์จด้วยจำนวนเท่ากับแบตเตอรี่ที่เหลือแบบอนุกรม] }

- อัลกอริทึมที่เกี่ยวกับการปลดแบตเตอรี่

53. ถ้า (แบตเตอรี่ชุดที่ 6 ถูกชาร์จ และ แบตเตอรี่ชุดที่ 5 ยังชาร์จไม่เสร็จ) แล้ว {

ถ้า [V_{Pmax} เป็น A, B, C, D, E, F, G, H, I, J หรือ K] แล้ว

[ปลดแบตเตอรี่ทุกชุดออกจากการชาร์จ] }

54. ถ้า (แบตเตอรี่ชุดที่ 6 ถูกชาร์จ และ แบตเตอรี่ชุดที่ 5 ชาร์จเสร็จสิ้นสมบูรณ์) แล้ว {

ถ้า [V_{Pmax} เป็น A, B, C, D หรือ E] แล้ว

[ปลดแบตเตอรี่ทุกชุดออกจากการชาร์จ] }

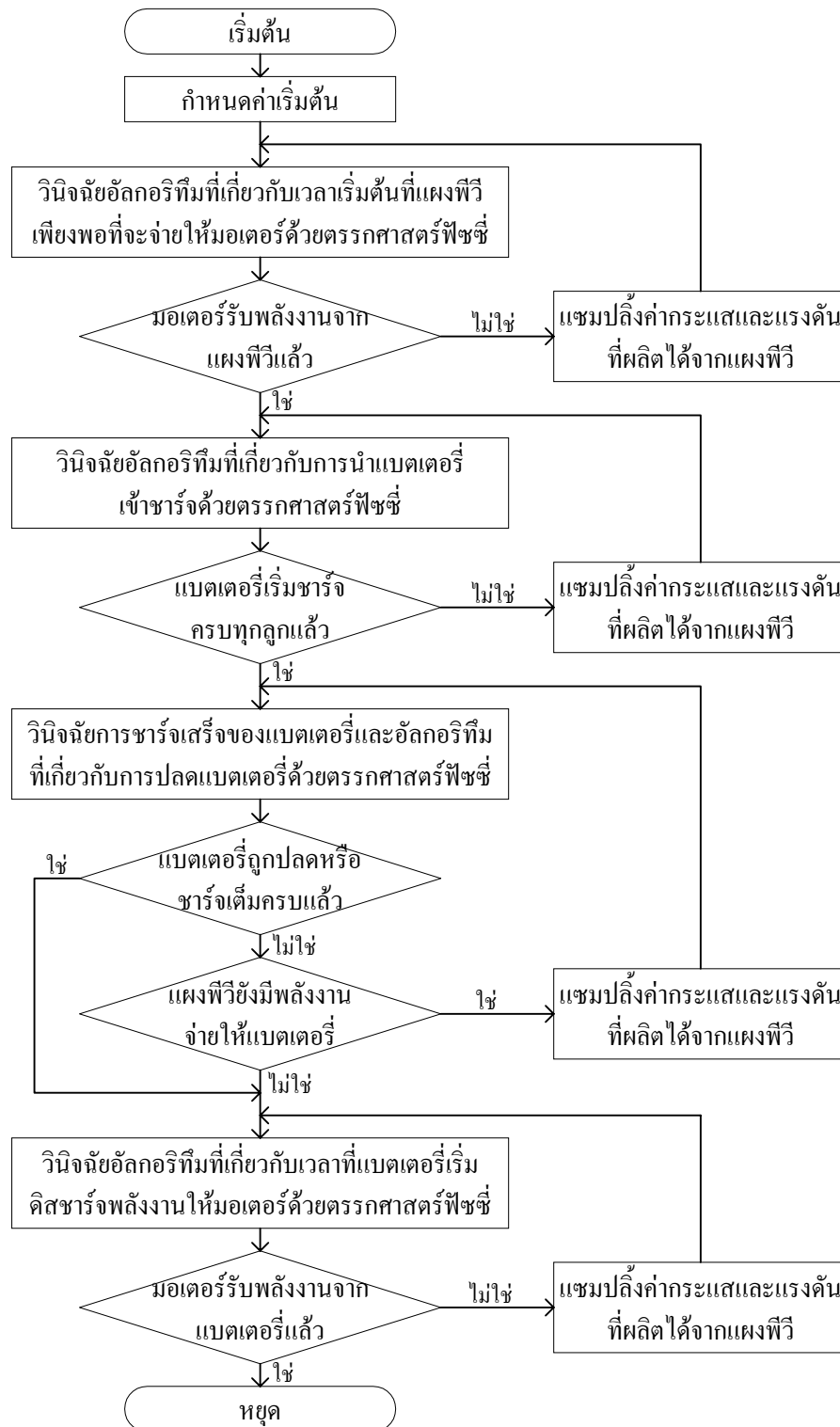
- อัลกอริทึมที่เกี่ยวกับมอเตอร์รับพลังงานจากแบตเตอรี่

55. ถ้า (แบตเตอรี่มีจำนวนการชาร์จเสร็จสิ้นสมบูรณ์ ≥ 10 ลูก) แล้ว {

ถ้า [I_{Pmax} เป็น A หรือ B] แล้ว

[มอเตอร์รับพลังงานจากแบตเตอรี่ที่ดิสชาร์จให้] }

จากนั้นดำเนินการอนุมัติพืชซึ่งอัลกอริทึมดังกล่าวด้วยโปรแกรมภาษา C โดยทำการจำลองผลระบบเพื่อทดสอบและวิเคราะห์การใช้พลังงานเมื่อมีตัวควบคุมกำกับสั่งการ (รายละเอียดปรากฏอยู่ในภาคผนวก ข. ของงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้) การทำงานของโปรแกรมอาจแทนได้ด้วยแผนภูมิดังภาพที่ 6.7 ระบบควบคุมที่ปรากฏอยู่ในแผนภูมินี้ จะเป็นระบบควบคุมพีซีแบบเวลาจริง ทั้งนี้เนื่องจากทุกๆ ค่าของการสุ่มสัญญาณจะมีการวินิจฉัยอัลกอริทึมด้วยตรรกศาสตร์พีซีซึ่งอยู่เสมอทุกครั้ง การแซมปลิงหรือสุ่มสัญญาณค่ากระแสและแรงดันที่ผลิตได้จากแผงพีวี ได้มาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแผงพีวี ตัวควบคุมตามรอยกำลังงานสูงสุด รวมทั้งความเข้มแสงอาทิตย์ โดยจะทำการสุ่มสัญญาณทุกๆ 0.01 ชั่วโมง (36 วินาที) ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมจะมีลักษณะเรียงเป็นลำดับตามอัลกอริทึมที่เกี่ยวข้องกับผลตอบของระบบในข้างต้น โดยจะดำเนินการหาผลตอบของระบบให้แล้วเสร็จเป็นลำดับเรียงกันไป



ภาพที่ 6.7 แผนภูมิแสดงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมจำลองผลตัวควบคุม

ส่วนโปรแกรมจำลองผลตัวควบคุมกำกับสั่งการซึ่งแสดงไว้ในภาคผนวก ข. มีคำอธิบายโปรแกรมโดยย่อดังนี้ โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นแบ่งออกได้เป็น 4 ส่วน คือ

- วินิจฉัยค่ากระแสและแรงดันที่แผงพีวีผลิตได้ว่ามีความเพียงพอที่จะจ่ายให้มอเตอร์ และเพียงพอที่จะชาร์จแบตเตอรี่ได้ก็ถูกอนุกรม, ก็ถูกขนานหรือก็ถูกผสมทั้งอนุกรมและขนานด้วยปริมาณลูกมากที่สุด
- พิจารณาว่าแบตเตอรี่ชาร์จเสร็จสิ้นสมบูรณ์บ้างแล้วหรือไม่ และอาจต้องทำการปลดแบตเตอรี่ออก ถ้าแผงพีวีไม่มีพลังงานเพียงพอที่จะจ่าย
- ดำเนินการดีสชาร์จแบตเตอรี่ให้แก่มอเตอร์ ถ้าพลังงานจากแผงพีวีไม่มีความเพียงพอที่จะจ่ายให้มอเตอร์ได้อีก
- บันทึกลักษณะสมบัติการใช้พลังงานของมอเตอร์และแบตเตอรี่ เพื่อวิเคราะห์และเปรียบเทียบกับในกรณีที่ยังไม่มีตัวควบคุม

ประกอบด้วยตัวแปรต่างๆ คือ

j, n, i, m	= ดัชนีการนับ
G _{batt}	= ปริมาณของแบตเตอรี่ต่อชุด
N _{batt}	= ปริมาณผลรวมของแบตเตอรี่ทั้งหมด
T	= คาบเวลาการสุ่มสัญญาณ (h)
I _a , V _t	= ค่ากระแส (A) และแรงดัน (V) ที่ป้อนให้แก่มอเตอร์ ตามลำดับ
I _{str}	= ค่ากระแสที่ใช้ในการเริ่มชาร์จแบตเตอรี่ในช่วง CCC (A)
V _{strfull}	= ค่าแรงดันที่แบตเตอรี่แต่ละลูกชาร์จเต็ม (V)
np	= จำนวนมอดูลที่ต่อขนานกันของแผงพีวี
ns	= จำนวนเซลล์ที่ต่ออนุกรมกันของแผงพีวี
I _{rs} , q, A, k, Temp	= ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแผงพีวี
CCC	= ช่วงเวลาการชาร์จด้วยอัตรากระแสคงที่ (h)
t	= เวลา (h)
fitimeccc[10]	= ค่าเวลาดำเนินการของช่วง CCC ของแบตเตอรี่ (h), เป็นตัวแปรอาร์เรย์
S	= ค่าความเข้มแสงอาทิตย์ (W/m ²)
I _{ph}	= ค่ากระแสโฟโต (A)

I_{pmax}, V_{pmax} = ค่ากระแส (A) และแรงดัน (V) ที่ผลิตได้จากแผงพีวีที่ทำให้เกิดกำลังงานสูงสุดตามลำดับ

I_{req} = ปริมาณกระแสที่มอเตอร์และเบตเตอร์ต้องการ (A)

โปรแกรมจำลองผลตัวควบคุมกำกับสั่งการโดยใช้ตรรกศาสตร์ฟัซซี่ `simfuz1.cpp` ได้รับการพัฒนาขึ้น โดยมีหน้าที่ในการคำนวณหาค่าเวลาและพลังงานที่แผงพีวีจ่ายให้แก่มอเตอร์และเบตเตอร์ และดำเนินการบันทึกสถานะภาพการใช้พลังงานนั้นๆ ของระบบ อีกทั้งยังมีหน้าที่ในการพิจารณาการชาร์จเสร็จสมบูรณ์แล้วของเบตเตอร์ และการปลดเบตเตอร์ออกเมื่อพลังงานจากแผงพีวีไม่เพียงพอ รวมถึงมีหน้าที่ในการคิซาร์จพลังงานจากเบตเตอร์ให้แก่มอเตอร์ เมื่อพลังงานจากแผงพีวีไม่เพียงพอที่จะจ่ายให้มอเตอร์แล้ว โดยจะประกอบไปด้วยฟังก์ชันย่อย (subfunction) ดังต่อไปนี้

`simfuz2` มีหน้าที่ในการคำนวณหาค่าต่างๆ ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบ อาทิเช่น แบบจำลองของแผงพีวี และแบบจำลองความเข้มแสงอาทิตย์ เป็นต้น เพื่อนำมาใช้เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์พลังงานในระบบ

`simfuz3` มีหน้าที่ในการคำนวณหาค่าปริมาณกระแสที่มอเตอร์และเบตเตอร์ต้องการใช้ในการชาร์จช่วง CVC โดยทำการพิจารณาในกรณีที่เริ่มชาร์จในช่วงเวลาที่เบตเตอร์ก่อนหน้าชุดที่กำลังพิจารณาข้างล่างอยู่ในช่วง CVC บ้างแล้วบางชุดหรือทุกชุด

ผลการดำเนินงานเพื่อทดสอบและวิเคราะห์การใช้พลังงานของตัวควบคุมจะได้รับการกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

6.4 การทดสอบตัวควบคุมกำกับสั่งการแบบฟัซซี่ด้วยการจำลองผล

การศึกษาและวิเคราะห์พลวัตทางพลังงานของระบบในบทที่ 5 ที่ผ่านมา ได้มีการอธิบายโดยละเอียดถึงผลการดำเนินงานจำลองระบบเมื่อยังไม่มีการใช้ตัวควบคุมกำกับสั่งการ โดยเมื่อนำผลการจำลองดังกล่าวมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองผลเมื่อมีการใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซี่มากำกับสั่งการให้เบตเตอร์เข้าชาร์จที่ละลูกตามจังหวะเวลาที่เหมาะสมดังปรากฏในบทที่ 6 นี้ อาจสังเกตเห็นว่า ที่ความเข้มแสงอาทิตย์คิดเป็นร้อยละของวันที่ฟ้าเปิด จาก 100% จนถึง 80% นั้น ตัวควบคุมที่พัฒนาขึ้นให้ผลในทางพลวัตของพลังงานแทบไม่แตกต่างกับกรณีที่ยังไม่มีการใช้ตัวควบคุมผลลัพธ์ทางพลวัตของพลังงานจึงคล้ายกันมาก จึงขอนำมาแสดงเป็นตัวอย่างเฉพาะที่ความเข้มแสง 100% เท่านั้น และจะไม่ขอแสดงรายละเอียดซ้ำอีก แต่อาจสรุปโดยรวมได้ว่า แผงพีวีสามารถจ่าย

พลังงานให้แก่มอเตอร์ได้อย่างเพียงพออีกทั้งยังชาร์จแบตเตอรี่ได้เสร็จสิ้นสมบูรณ์ทั้ง 50 ลูก ก่อนเวลา 16.00 น. อย่างไรก็ตาม อาจมีความแตกต่างกันในด้านจังหวะเวลาที่นำชุดของแบตเตอรี่เข้าชาร์จอยู่บ้าง แต่ก็มิได้มีนัยสำคัญอะไร โดยสามารถแสดงผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองพร้อมทั้งแสดงภาพพลวัตทางด้านกระแสและแรงดันเมื่อความเข้มแสงเป็น 100% ของวันที่ฟ้าเปิดดังภาพที่ 6.8 และ 6.9 ตามลำดับ

- กรณีความเข้มแสงอาทิตย์เป็น 100% ของวันที่ฟ้าเปิด

Motor take energy from solar panel at 0.26h

Batt group 1 have 9 batts in series charge start at time 0.46h

Which I,V,P for supply batt and motor = 25.31A,126.90V,3212W respectively

Batt group 2 have 9 batts in series charge start at time 0.89h

Which I,V,P for supply batt and motor = 45.01A,126.90V,5712W respectively

Batt group 3 have 10 batts in series charge start at time 1.26h

Which I,V,P for supply batt and motor = 59.92A,141.00V,8448W respectively

Batt group 4 have 10 batts in series charge start at time 1.40h

Which I,V,P for supply batt and motor = 65.07A,141.00V,9174W respectively

Batt group 5 have 10 batts in series charge start at time 1.76h

Which I,V,P for supply batt and motor = 77.07A,141.00V,10866W respectively

Batt group 6 have 2 batts in series charge start at time 2.04h

Which I,V,P for supply batt and motor = 85.17A,141.00V,12008W respectively

Batt group 1 charge full at time 5.25h

Batt group 2 charge full at time 5.68h

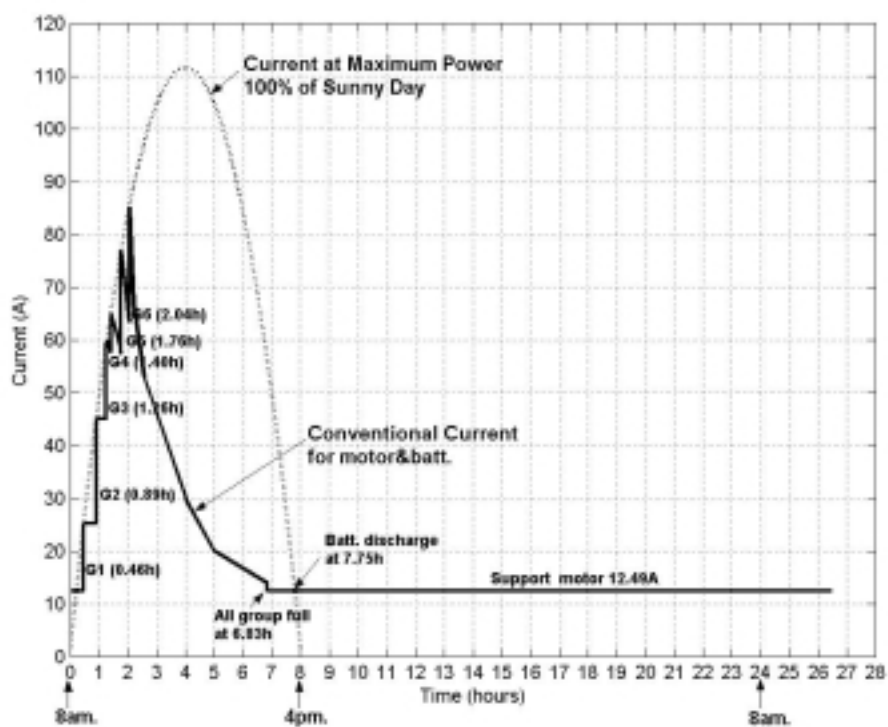
Batt group 3 charge full at time 6.05h

Batt group 4 charge full at time 6.19h

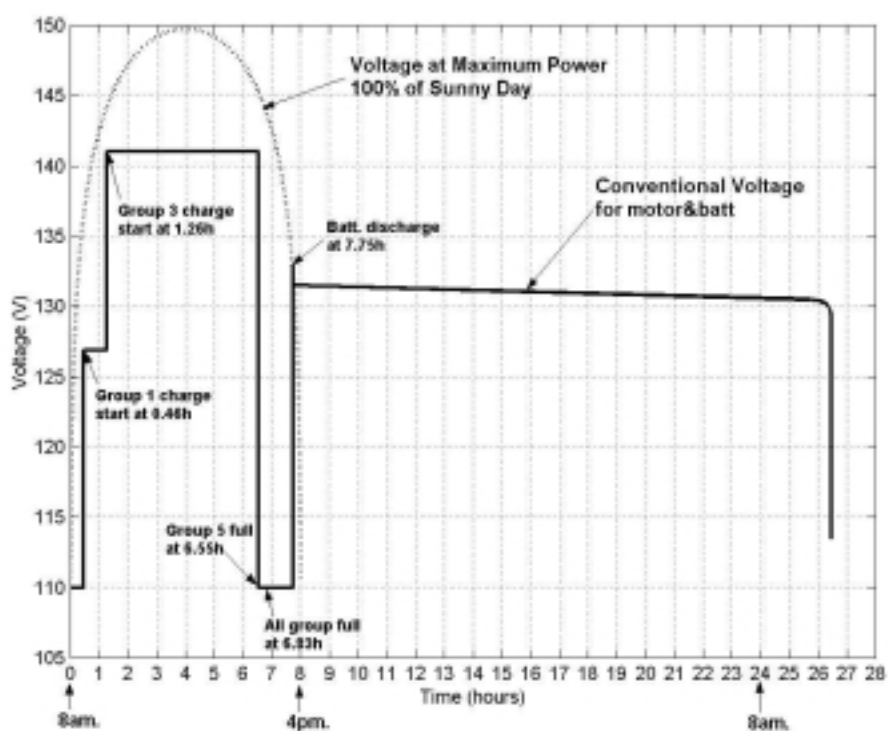
Batt group 5 charge full at time 6.55h

Batt group 6 or all batts charge full at time 6.83h

Batt discharge energy to motor at time 7.75h



ภาพที่ 6.8 พลวัตทางด้านกระแสของระบบเมื่อมีตัวควบคุมในกรณี
ความเข้มแสงอาทิตย์เป็น 100% ของวันที่ฟ้าเปิด



ภาพที่ 6.9 พลวัตทางด้านแรงดันของระบบเมื่อมีตัวควบคุมในกรณี
ความเข้มแสงอาทิตย์เป็น 100% ของวันที่ฟ้าเปิด

ส่วนในกรณีที่ความเข้มแสงอาทิตย์ตลอดทั้งวันมีค่าอ่อน โดยคิดเป็นร้อยละของวันที่ฟ้าเปิด ตั้งแต่ 70% จนถึง 50% นั้น ตัวควบคุมกำกับสั่งการที่พัฒนาขึ้นจะให้ผลลัพธ์ทางการจัดการพลังงานที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับกรณีที่ยังไม่มีตัวควบคุม และเมื่อเทียบกับกรณีที่ตัวควบคุมมีการจัดแบตเตอรี่เข้าชาร์จทีละชุด โดยมีทั้งหมด 10 ชุด แต่ละชุดมีแบตเตอรี่ 5 ลูกต่ออนุกรมกัน (สราวุฒิสุจิตจร และ เพล็จ ฝ่าละอ, 2544) ตัวควบคุมที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ก็จะให้ผลทางด้านพลวัตของพลังงานที่ดีกว่าเช่นกัน โดยจะยกตัวอย่างการพิจารณาที่ความเข้มแสงอาทิตย์เป็น 70% และ 50% ของวันที่ฟ้าเปิดตามลำดับ เนื่องจากที่ความเข้มแสงนี้ สามารถให้ความเข้าใจในภาพรวมได้อย่างชัดเจน

- กรณีความเข้มแสงอาทิตย์เป็น 70% ของวันที่ฟ้าเปิด

Motor take energy from solar panel at 0.39h

Batt group 1 have 9 batts in series charge start at time 0.69h

Which I,V,P for supply batt and motor = 25.32A,126.90V,3213W respectively

Batt group 2 have 9 batts in series charge start at time 1.38h

Which I,V,P for supply batt and motor = 45.04A,126.90V,5716W respectively

Batt group 3 have 10 batts in series charge start at time 1.81h

Which I,V,P for supply batt and motor = 55.01A,141.00V,7757W respectively

Batt group 4 have 10 batts in series charge start at time 2.33h

Which I,V,P for supply batt and motor = 64.69A,141.00V,9122W respectively

Batt group 5 have 10 batts in series charge start at time 2.64h

Which I,V,P for supply batt and motor = 69.22A,141.00V,9760W respectively

Batt group 6 have 2 batts in series charge start at time 3.20h

Which I,V,P for supply batt and motor = 75.05A,141.00V,10582W respectively

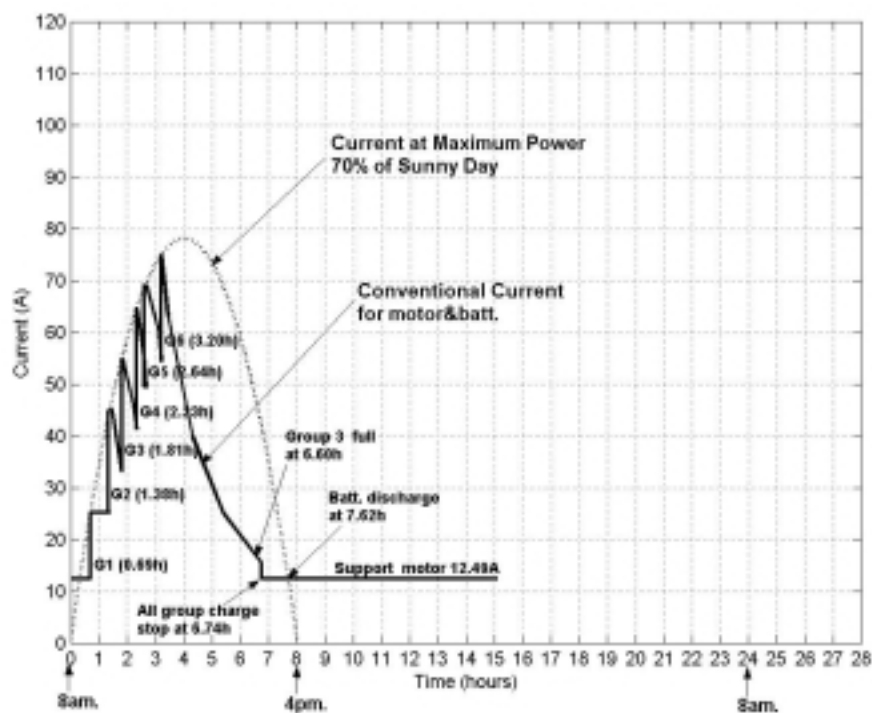
Batt group 1 charge full at time 5.48h

Batt group 2 charge full at time 6.17h

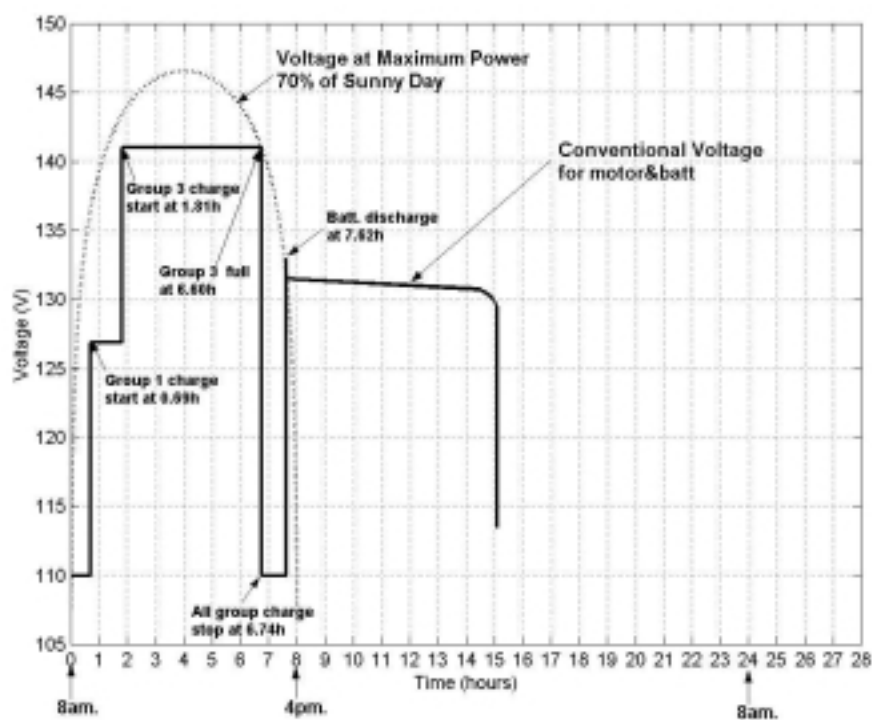
Batt group 3 charge full at time 6.60h

Batt all group charge stop at time 6.74h

Batt discharge energy to motor at time 7.62h



ภาพที่ 6.10 พลวัตทางด้านกระแสของระบบเมื่อมีตัวควบคุมในกรณี
ความเข้มแสงอาทิตย์เป็น 70% ของวันที่ฟ้าเปิด



ภาพที่ 6.11 พลวัตทางด้านแรงดันของระบบเมื่อมีตัวควบคุมในกรณี
ความเข้มแสงอาทิตย์เป็น 70% ของวันที่ฟ้าเปิด

จากผลการจำลองเมื่อยังไม่มีตัวควบคุมที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 5 ที่ผ่านมา เมื่อแสงอาทิตย์มีความเข้มแสงเป็น 70% ของวันที่ฟ้าเปิด การชาร์จแบตเตอรี่ดำเนินการเสร็จสมบูรณ์ได้ 20 ลูก และมอเตอร์ได้รับพลังงานจากแผงฟิวอย่างเพียงพอตลอดช่วงเวลากลางวัน โดยการชาร์จแบตเตอรี่ทุกชุดจะยุติลงที่เวลา 14.45 น. แต่ในกรณีที่มีตัวควบคุมมากำกับสิ่งการนี้ จากผลลัพธ์และกราฟพลวัตทางด้านกระแสและแรงดันที่แสดงดังภาพที่ 6.10 และ 6.11 จะสังเกตเห็นว่า ที่ความเข้มแสงเป็น 70% นี้ สามารถชาร์จแบตเตอรี่ได้ทั้งหมด 28 ลูกอย่างสมบูรณ์ โดยแบตเตอรี่ชุดที่ 1 เข้าชาร์จด้วยปริมาณ 9 ลูกที่เวลาประมาณ 08.40 น. ด้วยปริมาณกระแสและแรงดันที่สอดคล้องกับแบตเตอรี่ชุดนี้ดังดูได้จากผลการจำลอง ซึ่งตั้งแต่เวลาประมาณ 08.25 น. เป็นต้นมา แผงฟิวมีพลังงานเพียงพอที่จะจ่ายให้มอเตอร์แล้ว ส่วนแบตเตอรี่ชุดที่ 2 จะเข้าชาร์จด้วยปริมาณ 9 ลูกที่เวลา 09.25 น. จากนั้นก็เป็นการชาร์จด้วยปริมาณ 10 ลูกของแบตเตอรี่ชุดที่ 3, 4, และ 5 ไปตามลำดับ และแบตเตอรี่ชุดที่ 6 เข้าชาร์จเป็นชุดสุดท้ายด้วยปริมาณ 2 ลูกที่เวลา 11.10 น. ซึ่งมอเตอร์ก็ยังรับพลังงานจากแผงฟิวอย่างเพียงพอตลอดช่วงกลางวันเช่นกัน โดยการชาร์จจะยุติลงที่เวลาประมาณ 14.45 น. การดิสชาร์จแบตเตอรี่เพื่อป้อนพลังงานให้แก่มอเตอร์ในช่วงเย็นและช่วงค่ำด้วยปริมาณ 28 ลูกนี้สามารถกระทำได้ 7 ชั่วโมงโดยประมาณ โดยเริ่มดิสชาร์จที่เวลาประมาณ 15.40 น. และจะยุติการทำงานของระบบโดยรวมลงที่เวลาประมาณ 23.00 น.

- กรณีความเข้มแสงอาทิตย์เป็น 50% ของวันที่ฟ้าเปิด

Motor take energy from solar panel at 0.56h

Batt group 1 have 9 batts in series charge start at time 1.01h

Which I,V,P for supply batt and motor = 25.03A,126.90V,3176W respectively

Batt group 2 have 9 batts in series charge start at time 1.81h

Which I,V,P for supply batt and motor = 39.30A,126.90V,4987W respectively

Batt group 3 have 9 batts in series charge start at time 2.23h

Which I,V,P for supply batt and motor = 45.02A,126.90V,5713W respectively

Batt group 4 have 10 batts in series charge start at time 3.19h

Which I,V,P for supply batt and motor = 53.55A,141.00V,7551W respectively

Batt group 5 have 10 batts in series charge start at time 3.52h

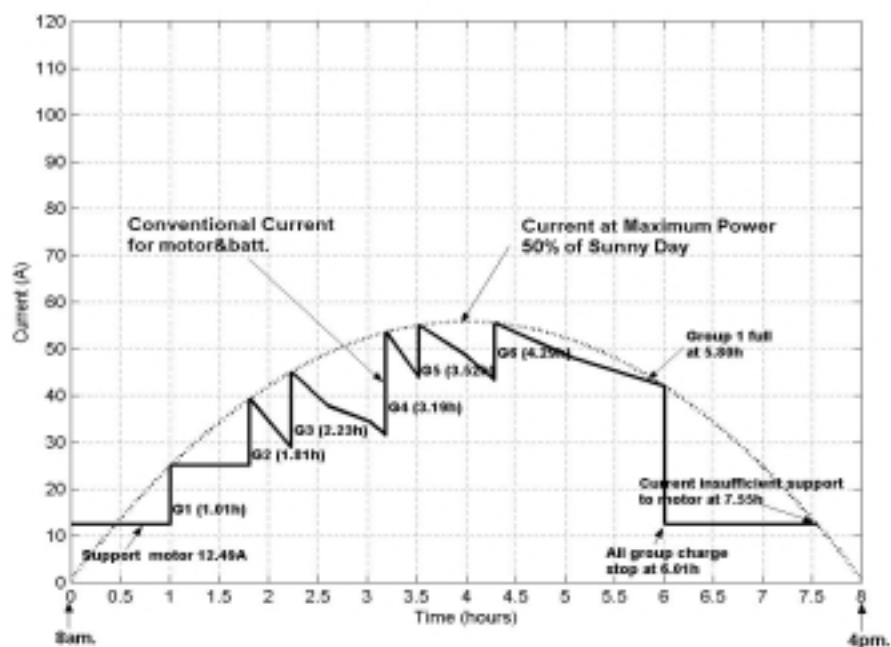
Which I,V,P for supply batt and motor = 55.02A,141.00V,7758W respectively

Batt group 6 have 3 batts in series charge start at time 4.29h

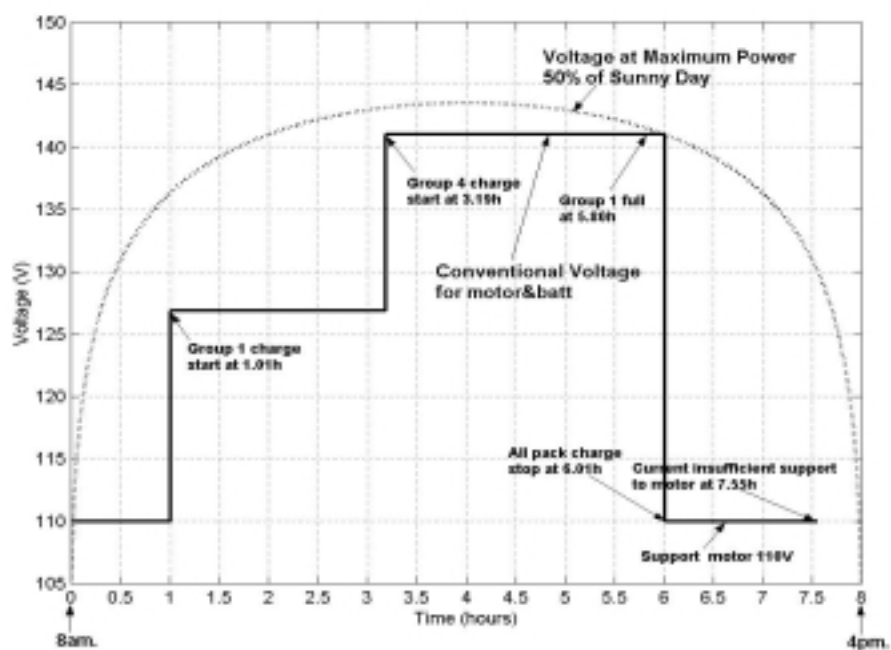
Which I,V,P for supply batt and motor = 55.52A,141.00V,7829W respectively

Batt group 1 charge full at time 5.80h

Batt all group charge stop at time 6.01h



ภาพที่ 6.12 พลวัตทางด้านกระแสของระบบเมื่อมีตัวควบคุมในกรณี
ความเข้มแสงอาทิตย์เป็น 50% ของวันที่ฟ้าเปิด



ภาพที่ 6.13 พลวัตทางด้านแรงดันของระบบเมื่อมีตัวควบคุมในกรณี
ความเข้มแสงอาทิตย์เป็น 50% ของวันที่ฟ้าเปิด

เมื่อความเข้มแสงอาทิตย์อ่อนลงมากเป็น 50% ของวันที่ฟ้าเปิด ทั้งกรณีที่ไม่มีและมีตัวควบคุม มอเตอร์ก็ยังคงรับพลังงานจากแผงพีวีอย่างเพียงพอตลอดทั้งช่วงเวลากลางวัน แต่ในกรณีที่ไม่มีตัวควบคุม การชาร์จแบตเตอรี่จะประสบปัญหาโดยไม่สามารถชาร์จได้สมบูรณ์เลยแม้แต่ชุดเดียว โดยตัวควบคุมที่นำมาใช้นี้ จะช่วยให้สามารถชาร์จแบตเตอรี่ได้สมบูรณ์เป็นปริมาณ 1 ชุด หรือ 9 ลูก ดังแสดงด้วยผลลัพธ์และกราฟพลวัตทางด้านกระแสและแรงดันที่ปรากฏดังภาพที่ 6.12 และ 6.13 ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ด้วยปริมาณแบตเตอรี่ที่ชาร์จสมบูรณ์แล้วเท่านี้ ก็ไม่สามารถนำไปดิสชาร์จให้มอเตอร์ได้เลยในช่วงเย็นและช่วงค่ำ แต่ก็จะมีประโยชน์ในการเริ่มต้นชาร์จในวันใหม่ เนื่องจากมีแบตเตอรี่ที่ชาร์จเสร็จสมบูรณ์แล้วเป็นทุนเดิมอยู่ปริมาณหนึ่ง

จากการนำเสนอและอภิปรายผลในกรณีที่ระบบไม่มีและมีตัวควบคุมนั้น จะเห็นได้ว่าตัวควบคุมกำกับสั่งการแบบพีชซีสามารถช่วยให้เกิดการใช้พลังงานจากแผงพีวีมีความคุ้มค่ามากยิ่งขึ้น แม้จะไม่สูงมากนักก็ตาม ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากในระบบพลังงานผสมผสานที่พิจารณานี้ ประกอบด้วยโหลดที่แผงพีวีต้องจ่ายให้เพียงสองกลุ่ม คือมอเตอร์และแบตเตอรี่เท่านั้น และมอเตอร์เองก็รับพลังงานด้วยปริมาณคงที่ตลอดทุกช่วงเวลา จึงมีเพียงแค่แบตเตอรี่เท่านั้นที่ตัวควบคุมจะเข้ามามีบทบาทได้ อีกประการหนึ่งซึ่งส่งผลให้ตัวควบคุมมีบทบาทน้อยได้แก่ การพิจารณาค่าความเข้มแสงอาทิตย์ที่มีลักษณะคงที่สม่ำเสมอตลอดทั้งวัน ซึ่งส่งผลให้การใช้พลังงานมีลักษณะที่ตายตัวโดยจะสังเกตได้จาก การมีพลังงานสำรองจากแผงพีวีหลังเที่ยงวันค่อนข้างมากทุกๆ ค่าเฉลี่ยความเข้มแสงอาทิตย์ ดังนั้น การใช้ตัวควบคุมกำกับสั่งการในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ให้เกิดประโยชน์อย่างคุ้มค่า น่าจะทดลองใช้กับระบบที่มีโหลดอยู่หลายๆ กลุ่ม และลองพิจารณากับค่าความเข้มแสงอาทิตย์ที่มีลักษณะไม่สม่ำเสมอบ้าง ซึ่งการกระทำเช่นนี้จะส่งผลให้การดำเนินงานพิจารณาระบบจะมีความยุ่งยากและซับซ้อนมากยิ่งขึ้น

6.5 สรุป

ในบทนี้ ได้นำเสนอทฤษฎีระบบควบคุมโดยใช้ตรรกศาสตร์พีชซี ตลอดจนการประยุกต์ใช้พีชซีลอจิกเพื่อแก้ปัญหาในระบบควบคุมที่มีความไม่เป็นเชิงเส้น อย่างเช่นระบบพลังงานผสมผสานที่ปรากฏในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ โดยได้ดำเนินการออกแบบและอนุวัตตัวควบคุมกำกับสั่งการแบบพีชซีเพื่อจัดการพลังงาน เพื่อก่อให้เกิดการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ให้ได้มากที่สุดในช่วงเวลาใดเวลาหนึ่งเท่าที่อาจจะทำได้ ซึ่งตัวควบคุมที่ออกแบบนี้จะเป็นตัวควบคุมพีชซีแบบเวลาจริง ที่ทำหน้าที่เฝ้าตรวจสอบสถานะทางพลังงานของแผงพีวี แล้วดำเนินการตัดสินใจสั่งการถ่ายโอนพลังงานให้แก่อุปกรณ์ต่างๆ ในระบบอย่างเหมาะสม โปรแกรมจำลองผลตัวควบคุมและพีชซีอัลกอริทึมในบทนี้ได้รับการพัฒนาขึ้นด้วย BORLAND C++TM โดยมีรายละเอียดของโปรแกรมแสดงอยู่ในภาค

ผนวก ข. การศึกษาและเปรียบเทียบผลการจำลองระบบเพื่อแสดงให้เห็นถึงประสิทธิผลของการมีตัวควบคุมกำกับสั่งการดังกล่าว ยืนยันว่า การใช้พลังงานแสงอาทิตย์ให้ได้คุ้มค่าในทุกๆ โอกาสสามารถกระทำได้เมื่อใช้อัลกอริทึมที่พัฒนาขึ้นนี้

บทที่ 7

สรุปและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุป

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการศึกษา วิเคราะห์ และดำเนินการออกแบบ ระบบพลังงานผสมผสานที่มีการใช้แหล่งพลังงานต่างประเภทกันในระบบ ซึ่งประกอบด้วยแหล่งจ่ายพลังงาน ได้แก่ แผงโซลาร์เซลล์และแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด โดยมีมอเตอร์กระแสตรงขนาดพิกัด 2.5 แรงม้า ต่อควบปั๊ม หอยโข่งเป็นโหลดที่พร้อมปฏิบัติงานได้ตลอดทั้ง 24 ชั่วโมง ส่วนประกอบต่างๆ ของระบบมีลักษณะสมบัติทางพลวัตที่ไม่เป็นเชิงเส้นและยากแก่การทำความเข้าใจ ทำให้ต้องพึ่งพาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อนและการจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์ งานวิจัยจึงต้องบูรณาการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบ ดังแสดงรายละเอียดไว้ในบทที่ 2 ของงานวิจัย ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เหล่านี้ จะใช้เป็นเครื่องมือในการดำเนินการถ่ายโอนพลังงานในระบบอย่างเหมาะสมที่สุด ดังมีรายละเอียดปรากฏอยู่ในบทที่ 3 และนำไปสู่การอธิบายถึงการออกแบบจำนวนของแผงโซลาร์เซลล์และแบตเตอรี่ที่เหมาะสมในบทที่ 4 รวมทั้งมีการพัฒนาขึ้นเป็นโปรแกรมจำลองสถานการณ์ของระบบ ดังที่ได้อธิบายโครงสร้างของโปรแกรมไว้ในบทที่ 5 และดำเนินการศึกษาพลวัตทางพลังงานของระบบอย่างถ่องแท้ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ในการออกแบบและอนุวัตตัวควบคุมกำกับสั่งการแบบพีซีซีในการควบคุมและจัดการพลังงาน ดังแสดงอัลกอริทึมที่พัฒนาขึ้นและผลลัพธ์ของการจำลองผลตัวควบคุมไว้ในบทที่ 6

จากกระบวนการในการออกแบบจำนวนของแผงโซลาร์เซลล์และแบตเตอรี่ที่เหมาะสมของระบบพลังงานผสมผสานในบทที่ 4 ที่ผ่านมา ทำให้ทราบว่า กำลังงานไฟฟ้าจะมีความเพียงพอต่อการใช้งานมอเตอร์ได้ตลอดทั้ง 24 ชั่วโมงอย่างอิสระนั้น จะต้องประกอบด้วยแผงโซลาร์จำนวนทั้งสิ้น 200 มอดูล และแบตเตอรี่จำนวนทั้งสิ้น 50 ลูก ซึ่งมีความสามารถในการผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุดประมาณ 16 kW

ส่วนการพิจารณาในการทำให้เกิดการใช้พลังงานในระบบอย่างเหมาะสมที่สุด ที่ปรากฏในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ จะดำเนินการพิจารณาออกเป็น 3 ลักษณะ ได้แก่ ดำเนินการวิเคราะห์หาค่าอัตราส่วนการแปลงพลังงานของ ดีซี/ดีซี คอนเวอร์เตอร์ เพื่อเกิดการถ่ายโอนกำลังงานให้ได้สูงสุดต่อโหลดแต่ละชนิด ซึ่งโดยโครงสร้างแล้วจะต้องเป็น บัค/บูสต์ คอนเวอร์เตอร์ โดยได้อธิบายรายละเอียดไว้แล้วในบทที่ 3 อีกหนทางหนึ่งในการประหยัดพลังงานให้แก่ระบบ ได้แก่ การดำเนิน

งานหาหนทางจับเคลื่อนมอเตอร์ให้ประหยัดที่สุด ด้วยวิธีการลดกำลังงานสูญเสียในมอเตอร์ให้เหลือน้อยที่สุด ดังมีรายละเอียดแสดงไว้ในบทที่ 3 แล้วเช่นกัน และอีกรูปแบบหนึ่งที่สามารถใช้พลังงานจากแผงพีวีได้อย่างคุ้มค่า ได้แก่การแสวงหาโอกาสการใช้พลังงานที่แผงพีวีผลิตออกมาได้ให้มากที่สุด ด้วยการใช้ตัวควบคุมกำลังกับสั่งการแบบพีซี ซึ่งถูกออกแบบมาจากการศึกษาพลวัตทางพลังงานของระบบอย่างละเอียดในบทที่ 5 โดยมีรายละเอียดของโปรแกรมจำลองระบบที่พัฒนาขึ้นด้วย BORLAND C++TM แสดงไว้ในภาคผนวก ก. เพื่อทำงานเป็นตัวควบคุมพีซีแบบเวลาจริง ที่มีหน้าที่เฝ้าตรวจสอบสถานะทางพลังงานของแผงพีวี แล้วดำเนินการตัดสินใจสั่งการถ่ายโอนพลังงานให้แก่อุปกรณ์ต่างๆ ในระบบอย่างเหมาะสม ดังรายละเอียดที่แสดงไว้ในบทที่ 6 และมีรายละเอียดของโปรแกรมจำลองผลตัวควบคุม ที่ได้รับการพัฒนาขึ้นด้วย BORLAND C++TM เช่นกัน แสดงไว้ในภาคผนวก ข. จากการจำลองผลระบบเพื่อเปรียบเทียบระหว่างการมีตัวควบคุมกำลังกับสั่งการและเมื่อไม่มีตัวควบคุม พบว่าตัวควบคุมสามารถช่วยให้เกิดการใช้พลังงานจากแผงพีวีมีความคุ้มค่ามากขึ้น แม้จะยังไม่โดดเด่นมากนักก็ตาม โดยจะให้ผลลัพธ์ทางการจัดการพลังงานที่ดีขึ้นมากเมื่อความเข้มแสงอาทิตย์เฉลี่ยมีค่าอ่อนลง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะประเภทของโหลดในระบบยังไม่หลากหลายเท่าที่ควร อีกทั้งค่าความเข้มแสงอาทิตย์ที่พิจารณาก็มีลักษณะคงที่สม่ำเสมอตลอดทั้งวัน จึงส่งผลให้ไม่มีความยืดหยุ่นในการใช้พลังงาน ดังนั้นอาจเป็นที่น่าพิจารณาว่า การใช้งานระบบพลังงานผสมผสานอย่างคุ้มค่า นั้น น่าจะใช้กับโหลดหลายกลุ่มหลายประเภท ที่มีการกระจายการใช้งานตลอดช่วงระยะเวลากลางวัน และลองพิจารณาค่าความเข้มแสงอาทิตย์แบบไม่สม่ำเสมอ ซึ่งอาจช่วยให้ตัวควบคุมกำลังกับสั่งการมีบทบาทมากยิ่งขึ้น และได้ตัวควบคุมกำลังกับสั่งการเพื่อจัดการพลังงานให้แก่ระบบต้นแบบ

7.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรดำเนินการศึกษาและวิเคราะห์ การใช้งานระบบพลังงานผสมผสานเมื่อความเข้มแสงอาทิตย์ไม่มีความสม่ำเสมอทั้งวันเพื่อมาพิจารณาคุบ้าง โดยการสร้างโครงรูปของกราฟความเข้มแสงที่ไม่สม่ำเสมอขึ้น แล้วป้อนเป็นข้อมูลให้แก่โปรแกรมจำลองผล ซึ่งแน่นอนว่าโปรแกรมจำลองผลที่พัฒนาขึ้นใหม่นี้ ย่อมมีความยุ่งยากและซับซ้อนมากยิ่งขึ้นอย่างแน่นอน แต่ก็จะเป็นประโยชน์อย่างมาก ถ้าได้นำไปประยุกต์ใช้เข้ากับปัญหาจริงของระบบ

2. ควรประยุกต์ใช้ตัวควบคุมที่นำเสนอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ เข้ากับโหลดจริงที่มีพลวัตทางด้านพลังงานแตกต่างกันออกไป โดยทำการศึกษาและหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อจำลองโหลดเหล่านั้น

3. ควรทำการศึกษาระบบพลังงานผสมผสานให้มีขอบเขตกว้างยิ่งขึ้น โดยจะไม่จำกัดอยู่ที่แหล่งพลังงานเพียงไม่กี่ชนิด ซึ่งอาจพิจารณาทั้งแหล่งพลังงานจากแสงอาทิตย์ ลม น้ำ (ลำธารและน้ำตก) ชยะ มวลชีวภาพจากการเกษตรและกสิกรรม และมีแบตเตอรี่สำรองพลังงาน โดยดำเนินการออกแบบระบบควบคุมที่ครอบคลุมแหล่งพลังงานเหล่านี้ เพื่อจัดการพลังงานให้เกิดประโยชน์สูงสุด

เอกสารอ้างอิง

- กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน และ มหาวิทยาลัยศิลปากร. (ม.ป.ป.). **แผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์จากข้อมูลดาวเทียมสำหรับประเทศไทย** [ซีดี-รอม]. กรุงเทพฯ: กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงานร่วมกับมหาวิทยาลัยศิลปากร.
- สรารุณี สุจิตจร. (2538). พืชชีลลจกกับระบบควบคุม. **วารสารเทคโนโลยีสุรนารี**. 2 (3): 171-196.
- สรารุณี สุจิตจร และ เผด็จ เผ่าละออ (2544). รายงานการวิจัยเรื่องระบบขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงขนาด 1 กิโลวัตต์ที่มีการใช้พลังงานอย่างเหมาะสมที่สุดจากแหล่งพลังงานสุริยะ. สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- Alghuwainem, S. M. (1992). Steady-state performance of dc motors supplied from photovoltaic generators with step-up converter. **IEEE Transactions on Energy Conversion**. 7 (2): 267-272.
- Applebaum, J. (1988). The quality of load matching in a direct-coupling photovoltaic system. **IEEE Transactions on Energy Conversion**. 2 (4): 534-54.
- Bandara, G. E. M. D. C., Ivanov, R., and Gishin, S. (1999). Intelligent fuzzy controller for a lead-acid battery charger. **IEEE SMC'99 Conference Proceedings**. 6: 185-189.
- Casacca, M. A., Capobianco, M. R., and Salameh, Z. M. (1996). Lead acid battery storage configuration for improved available capacity. **IEEE Transactions on Energy Conversion**. 11 (1): 139-145.
- Chapman, S. J. (1991). **Electric machinery fundamentals**. 2nd ed. : McGraw-Hill.
- Harrington, S., Corporation, K., and Dunlop, J. (1992). Battery charge controller characteristics in photovoltaic systems. **IEEE AES MAGAZINE**. : 15-21.
- Hippner, M., Yamada, H., and Miauno, T. (1999). Iron loss analysis in linear dc motor. **IEEE Transactions on Magnetics**. 35 (5): 3715-3717.
- Hussein, K. H., Muta, I., Hoshino, T., and Osakada, M. (1995). Maximum photovoltaic power tracking: An algorithm for rapidly changing atmospheric condition. **IEE Proc-Gener. Transm. Distrib**. 142 (1): 59-64.

- Kutkut, N. H., and Divan, D. M. (1996). Dynamic equalization techniques for series battery stacks. **IEEE Telecommunications Energy Conference, 18th International.** : 514-521.
- Margaris, N., Goutas, T., Doulgeri, Z., and Paschali, A. (1991). Loss minimization in dc drives. **IEEE Transactions on Industrial Electronics.** 38 (5): 328-336.
- Pan, C., Chen, J., Chu, C., and Huang, Y. (1999). A fast power point tracker for photovoltaic power system. **Industrial Electronics Society, 1999. IECON'99 Proceedings.** 1: 390-393.
- Protogeropoulos, C., Marshall, R. H., and Brinkworth, B. J. (1994). Battery state of voltage modelling and an algorithm describing dynamic conditions for long-term storage simulation in a renewable system. **Solar Energy.** 53 (6): 517-527.
- Ramamurthi, V. P., and Subrahmanyam, V. (1991). Performance of a separately excited dc motor fed from a multiphase chopper. **TENCON'91, 1991. IEEE Region 10 International Conference on EC3-Energy, Computer, Communication and Control Systems.** 1: 238-241.
- Rynkiewicz, R. (1999). Discharge and charge modeling of lead acid batteries, **Applied Power Electronics Conference and Exposition. IEEE.** 2: 707-710.
- Saied, M.M. (1988). Matching of dc motors to photovoltaic generators for maximum daily gross mechanical energy. **IEEE Transactions on Energy Conversion.** 3 (3): 465-472.
- Saied, M. M., et al. (1991). Optimal design parameters for a pv array coupled to a dc motor via a dc- dc transformer. **IEEE Transactions on Energy Conversion.** 6 (4): 593-598.
- Salameh, Z. M., Casacca, M. A., and Lynch, W. A. (1992). A mathematical model for lead-acid batteries. **IEEE Transactions on Energy Conversion.** 7 (1): 93-97.
- Sousa, C. D., and Bose, K. (1994). A fuzzy set theory based control of a phase-controlled converter dc machine drive. **IEEE Transactions on Industry Application.** 30 (1): 34-44.
- Yao, Y., and Ramshaw, R. S. (1995). Optimized dc motor output in a photovoltaic system. **Can. J. Elect. & Comp. Eng.** 20 (2): 79-84.
- Zinger, Z., and Braunstein, A. (1981). Dynamic matching of a solar-electrical (photovoltaic) system an estimation of the minimum requirements on the matching system. **IEEE Transactions on Power Apparatus and systems.** 100 (3):1189-1192.

ภาคผนวก ก.

รายละเอียดโปรแกรมจำลองผลระบบพลังงาน

```

/*****
Program sim1.cpp by Padej Pao-la-or, March 2002, Suranaree University of Technology

```

This program computes time and energy for charge and discharge batt 5 strings
and supply DC motor in case sunshine parabola

```

*****/
#include <stdio.h>
#include <conio.h>
#include <math.h>

#define LEN 30000
#define AREA 100.00 //AREA=Percent of sunny day;(50-100)

int sim2(void);
void sim3(void);
int sim4(void);
void sim5(void);
void sim6(void);

int n,i,j,m,repeat,count; //Declare variables
double T=0.001,Ia=12.49,Istr=16.00,Vt=110.00,Vstr=139.30,Vstrfull=141.00;
double np=25,ns=36*8,Irs=1.5e-8,q=1.6e-19,A=1.2,k=1.389e-23,Temp=298,CCC=0.79;
double V0=133.00,Vempty=115.00,Rtot=(10/5)*6.15e-2,K1=0.9,K2=2.2,nn=1.16;
double t,tstop,tfinal,C,times[10],fitimesccc[10],S[LEN],Iph[LEN],Inet[LEN];
double Ipmax[LEN],Vpmax[LEN],Pmax[LEN],Itot[LEN],Vtot[LEN],Ptot[LEN],Ibatt[LEN];

void main()
{ clrscr();
//This system have to support DC motor first
//Then support the charging of batts previously adequate current available
n=1;i=1;j=1;repeat=0;count=0;t=0;tstop=0;Ipmax[i-1]=0; //Initialize all variables

/*****/
//Compute time for motor take energy from solar panel
while(Ipmax[i-1]<Ia) //Motor take energy from batt discharge
{ sim2();
Itot[i]=Ia;
Vtot[i]=Vt;
Ptot[i]=Itot[i]*Vtot[i];
t=t+T;
i=i+1;
}
printf("Motor take energy from solar panel at %.2fh\n",t-T);

```



```

/*****/
//Compute time and energy for charge batt 1st string and supply DC motor
while(Vpmax[i-1]<Vstr)
{
    sim2();
    Itot[i]=Ia;
    Vtot[i]=Vt;
    Ptot[i]=Itot[i]*Vtot[i];
    t=t+T;
    i=i+1;
}
times[n]=t-T;
Itot[i-1]=Istr+Ia;
Vtot[i-1]=Vstr;
Ptot[i-1]=Itot[i-1]*Vtot[i-1];
printf("Batt string 1 charge start at time %.2fh\n",times[n]);
printf("Which I,V,P for supply batt and motor = %.2fA,%.2fV,%.0fW respectively\n",
Itot[i-1],Vtot[i-1],Ptot[i-1]);
fitimesccc[n]=times[n]+CCC; //Final time on CCC of batt string n
n=n+1;

/*****/
//Compute time and energy for charge batt 2nd string and supply DC motor
//Batt 2nd string charge start on CCC of batt 1st string
sim3();
//Batt 2nd string charge start on CVC of batt 1st string
while((t>fitimesccc[j])&&(Inet[i-1]<Istr*n))
{
    m=j;
    if(sim4())
    {
        break;
    }
}
fitimesccc[n]=times[n]+CCC;
n=n+1;

/*****/
//Compute time and energy for charge batt 3rd string and supply DC motor
//Batt 3rd string charge start on CCC of batt 1st and 2nd string
sim3();
//Batt 3rd string charge start between on CVC of batt 1st string and CCC of batt 2nd string
while((t>fitimesccc[j])&&(t<=fitimesccc[j+1])&&(Inet[i-1]<Istr*n))
{
    m=j;
    if(sim4())
    {
        break;
    }
}
//Batt 3rd string charge start on CVC of batt 1st and 2nd string
while((t>fitimesccc[j+1])&&(Inet[i-1]<Istr*n))
{
    m=j+1;
    if(sim4())
    {
        break;
    }
}
fitimesccc[n]=times[n]+CCC;
n=n+1;

```

```

/*****/
//Compute time and energy for charge batt 4th string and supply DC motor
//Batt 4th string charge start on CCC of batt 1st,2nd and 3rd string
sim3();
//Batt 4th string charge start between on CVC of batt 1st string and CCC of batt 2nd and 3rd string
while((t>fitimesccc[j])&&(t<=fitimesccc[j+1])&&(Inet[i-1]<Istr*n))
{
  m=j;
  if(sim4())
  { break;}
}
//Batt 4th string charge start between on CVC of batt 1st and 2nd string and CCC of batt 3rd string
while((t>fitimesccc[j+1])&&(t<=fitimesccc[j+2])&&(Inet[i-1]<Istr*n))
{
  m=j+1;
  if(sim4())
  { break;}
}
//Batt 4th string charge start on CVC of batt 1st,2nd and 3rd string
while((t>fitimesccc[j+2])&&(Inet[i-1]<Istr*n))
{
  m=j+2;
  if(sim4())
  { break;}
}
fitimesccc[n]=times[n]+CCC;
n=n+1;

/*****/
//Compute time and energy for charge batt 5th string and supply DC motor
//Batt 5th string charge start on CCC of batt 1st,2nd,3rd and 4th string
sim3();
//Batt 5th string charge start between on CVC of batt 1st string and CCC of batt 2nd,3rd and 4th string
while((t>fitimesccc[j])&&(t<=fitimesccc[j+1])&&(Inet[i-1]<Istr*n))
{
  m=j;
  if(sim4())
  { break;}
}
//Batt 5th string charge start between on CVC of batt 1st and 2nd string and CCC of batt 3rd and 4th
string
while((t>fitimesccc[j+1])&&(t<=fitimesccc[j+2])&&(Inet[i-1]<Istr*n))
{
  m=j+1;
  if(sim4())
  { break;}
}
//Batt 5th string charge start between on CVC of batt 1st,2nd and 3rd string and CCC of batt 4th string
while((t>fitimesccc[j+2])&&(t<=fitimesccc[j+3])&&(Inet[i-1]<Istr*n))
{
  m=j+2;
  if(sim4())
  { break;}
}
//Batt 5th string charge start on CVC of batt 1st,2nd,3rd and 4th string
while((t>fitimesccc[j+3])&&(Inet[i-1]<Istr*n))
{
  m=j+3;
  if(sim4())
  { break;}
}
fitimesccc[n]=times[n]+CCC;

```

```

/*****
t=t+T;
i=i+1;
while(t<=fitimesccc[m+1])
{
  if(sim2())
  { break;}
  sim5();
  Itot[i]=Ibatt[i]+Ia;
  Vtot[i]=Vstrfull;
  Ptot[i]=Itot[i]*Vtot[i];
  t=t+T;
  i=i+1;
}

/*****
while((m<=3)&&(t<=fitimesccc[m+2]))
{
  if(sim2())
  { break;}
  sim5();
  Itot[i]=Ibatt[i]+Ia-(Istr-Istr*exp(-(t-fitimesccc[m+1])));
  Vtot[i]=Vstrfull;
  Ptot[i]=Itot[i]*Vtot[i];
  t=t+T;
  i=i+1;
}
while((m<=2)&&(t<=fitimesccc[m+3]))
{
  if(sim2())
  { break;}
  sim5();
  Itot[i]=Ibatt[i]+Ia-(Istr-Istr*exp(-(t-fitimesccc[m+1])))-(Istr-Istr*exp(-(t-fitimesccc[m+2])));
  Vtot[i]=Vstrfull;
  Ptot[i]=Itot[i]*Vtot[i];
  t=t+T;
  i=i+1;
}
while((m==2)&&(t<=fitimesccc[n]+4))
{
  if(sim2())
  { break;}
  sim5();
  Itot[i]=Ibatt[i]+Ia-(Istr-Istr*exp(-(t-fitimesccc[m+1])))-(Istr-Istr*exp(-(t-fitimesccc[m+2])))-
(Istr-Istr*exp(-(t-fitimesccc[m+3])));
  Vtot[i]=Vstrfull;
  Ptot[i]=Itot[i]*Vtot[i];
  t=t+T;
  i=i+1;
}
while((m==3)&&(t<=fitimesccc[n]+4))
{
  if(sim2())
  { break;}
  sim5();
  Itot[i]=Ibatt[i]+Ia-(Istr-Istr*exp(-(t-fitimesccc[m+1])))-(Istr-Istr*exp(-(t-fitimesccc[m+2])));
  Vtot[i]=Vstrfull;
  Ptot[i]=Itot[i]*Vtot[i];
  t=t+T;
  i=i+1;
}

```

```

while((m==4)&&(t<=fitimesccc[n]+4))
{
    if(sim2())
        { break;}
    sim5();
    Itot[i]=Ibatt[i]+Ia-(Istr-Istr*exp(-(t-fitimesccc[m+1])));
    Vtot[i]=Vstrfull;
    Ptot[i]=Itot[i]*Vtot[i];
    t=t+T;
    i=i+1;
}

/*****/
count=1;//Reset variable
while((Ipmax[i-1]>=Ia)&&(count==1))
{
    if(sim2())
        { break;}
    Itot[i]=Ia;
    Vtot[i]=Vt;
    Ptot[i]=Itot[i]*Vtot[i];
    t=t+T;
    i=i+1;
}

/*****/
count=0; //Reset variable
while((count==0)&&(Ipmax[i-1]>=Ia)&&(fitimesccc[n]+4<t))
{
    if(sim2())
        { break;}
    Itot[i]=Ia;
    Vtot[i]=Vt;
    Ptot[i]=Itot[i]*Vtot[i];
    t=t+T;
    i=i+1;
}
if(repeat==5)
{
    sim2();
    tfinal=t-T;
    printf("Batt discharge energy to motor at time %.2fh\n",tfinal);
    C=5*70; //Capacity of battery
    sim6();
}

/*****/
FILE *fp1,*fp2,*fp3; //File pointers
fp1=fopen("Count.dat","wb"); //Open file
fwrite(&i,sizeof(int),1,fp1); //Write data to "Count.dat"
fclose(fp1); //Close file
fp2=fopen("Current.dat","wb");
fwrite(&Itot,sizeof(double),i,fp2); //Write data to "Current.dat"
fclose(fp2);
fp3=fopen("Voltage.dat","wb");
fwrite(&Vtot,sizeof(double),i,fp3); //Write data to "Voltage.dat"
fclose(fp3);

/*****/
getch();
}

```

```

#####
//Model of solar insolation,PV array and MPPT
//Compute time which batt each string charge full
//Compute time batt charge stop
int sim2(void)
{  if((repeat==0)&&(t>=fitimesccc[1]+4))
    {   printf("Batt string 1 charge full at time %.2fh\n",t-T);
        repeat=1;
    }
    if((repeat==1)&&(t>=fitimesccc[2]+4))
    {   printf("Batt string 2 charge full at time %.2fh\n",t-T);
        repeat=2;
    }
    if((repeat==2)&&(t>=fitimesccc[3]+4))
    {   printf("Batt string 3 charge full at time %.2fh\n",t-T);
        repeat=3;
    }
    if((repeat==3)&&(t>=fitimesccc[4]+4))
    {   printf("Batt string 4 charge full at time %.2fh\n",t-T);
        repeat=4;
    }
    if((repeat==4)&&(t>=fitimesccc[5]+4))
    {   printf("Batt string 5 or all string charge full at time %.2fh\n",t-T);
        repeat=5;
    }
    if((n==5)&&(repeat<4)&&(Vtot[i-1]>Vpmax[i-1])) //Knew batt all string will charge stop when
charge start already all string
    {   tstop=t-T;
        printf("Batt all string charge stop at time %.2fh\n",tstop);
        repeat=6;
        return 1;
    }
    if((n==5)&&(tstop==t-T)&&(count==0))
    {   return 1;}

/*****/
if(t<=8) //Careful log domain error due to 1 day have 8 hours (8am.-4pm.)
{   S[i]=(940-(58*pow(t-4,2)))*(AREA/100); //Define for solar insolation
    Iph[i]=(5*np/1000)*S[i]; //Define for photocurrent
    Ipmax[i]=0.95*Iph[i]; //Define for current at maximum power
    Vpmax[i]=(k*Temp*A*ns/q)*log(((0.06/Irs)*(Iph[i]/np))+1); //Define for voltage at
maximum power
    Pmax[i]=Ipmax[i]*Vpmax[i]; //Maximum power
    Inet[i]=Ipmax[i]-Ia; //Available current after feeding motor
}
return 0;
}

```

```

#####
//Compute time and energy to start CCC charging
void sim3(void)
{   while((t<=fitimesccc[1])&&(Inet[i-1]<Istr*n))
    {   sim2();
        Itot[i]=Istr*(n-1)+Ia;
        Vtot[i]=Vstr+2.152*(t-times[1]); //Slope of voltage on CCC duration is 2.152
        Ptot[i]=Itot[i]*Vtot[i];
        t=t+T;
        i=i+1;
    }
    if(t<=fitimesccc[1])
    {   times[n]=t-T;
        Itot[i-1]=Istr*n+Ia;
        Ptot[i-1]=Itot[i-1]*Vtot[i-1];
        printf("Batt string %d charge start at time %.2fh\n",n,times[n]);
        printf("Which I,V,P for supply batt and motor = %.2fA,%.2fV,%.0fW respectively\n",
        Itot[i-1],Vtot[i-1],Ptot[i-1]);
    }
}

#####
//Compute time and energy to start CVC charging
int sim4(void)
{   sim2();
    sim5();
    if(Inet[i]>=Ibatt[i])
    {   times[n]=t;
        Itot[i]=Ibatt[i]+Ia;
        Vtot[i]=Vstrfull;
        Ptot[i]=Itot[i]*Vtot[i];
        printf("Batt string %d charge start at time %.2fh\n",n,times[n]);
        printf("Which I,V,P for supply batt and motor = %.2fA,%.2fV,%.0fW respectively\n",
        Itot[i],Vtot[i],Ptot[i]);
        return 1;
    }
    else
    {   Itot[i]=Ibatt[i]+Ia-Istr;
        Vtot[i]=Vstrfull;
        Ptot[i]=Itot[i]*Vtot[i];
        t=t+T;
        i=i+1;
    }
    return 0;
}

```

```

#####
//Compute CVC charge intervals for all batt strings
void sim5(void)
{
  if(m==j)
    { Ibatt[i]=Istr*exp(-(t-fitimesccc[j]))+Istr*(n-m);}
  if(m==j+1)
    { Ibatt[i]=Istr*exp(-(t-fitimesccc[j]))+Istr*exp(-(t-fitimesccc[j]-(fitimesccc[j+1]-
fitimesccc[j]))) +Istr*(n-m);}
  if(m==j+2)
    { Ibatt[i]=Istr*exp(-(t-fitimesccc[j]))+Istr*exp(-(t-fitimesccc[j]-(fitimesccc[j+1]-
fitimesccc[j]))) +Istr*exp(-(t-fitimesccc[j]-(fitimesccc[j+2]-fitimesccc[j]))) +Istr*(n-m);}
  if(m==j+3)
    { Ibatt[i]=Istr*exp(-(t-fitimesccc[j]))+Istr*exp(-(t-fitimesccc[j]-(fitimesccc[j+1]-
fitimesccc[j]))) +Istr*exp(-(t-fitimesccc[j]-(fitimesccc[j+2]-fitimesccc[j]))) +Istr*exp(-(t-
fitimesccc[j]-(fitimesccc[j+3]-fitimesccc[j]))) +Istr*(n-m);}
}

#####
//Batt discharge energy to motor
void sim6(void)
{
  Itot[i]=Ia;
  Vtot[i]=V0;
  Ptot[i]=Itot[i]*Vtot[i];
  while(Vtot[i]>Vempty)
    {
      Itot[i+1]=Ia;
      Vtot[i+1]=V0-Rtot*Ia-(K1*(pow(Ia,nn))/C)*(t-tfinal-T)-(K2/(C-(pow(Ia,nn)*(t-tfinal-T))));
      Ptot[i+1]=Itot[i+1]*Vtot[i+1];
      t=t+T;
      i=i+1;
    }
  printf("Batt discharge until totally empty at time %.2fh",t-T);
}

//***** END PROGRAM *****/

```

ภาคผนวก ข.

รายละเอียดโปรแกรมจำลองผลตัวควบคุมกำกับสั่งการ


```

/*****
Program simfuz1.cpp by Padej Pao-la-or, March 2002, Suranaree University of Technology

This program computes time for charge and discharge batt 50 batts
and supply DC motor in case sunshine parabola with fuzzy logic controller (FLC)

*****/
#include <stdio.h>
#include <conio.h>
#include <math.h>

#define AREA 100.00//AREA=Percent of sunny day;(50-100)

void simfuz2(void);
void simfuz3(void);

int    j,n,i,m,Gbatt,Nbatt; //Declare variables
double T=0.01,Ia=12.49,Istr=16.00,Vt=110.00,Vstrfull=14.10;
double np=25,ns=36*8,Irs=1.5e-8,q=1.6e-19,A=1.2,k=1.389e-23,Temp=298,CCC=0.79;
double t,fitimeccc[10],S,Iph,Ipmax,Vpmax,Ireq;

void main()
{ clrscr();
//This system have to support DC motor first
//Then support the charging of batts previously adequate current available
  j=1;n=0;i=0;t=0;Ipmax=0;Vpmax=0;Ireq=0; //Initialize all variables

/*****/
//Compute time for motor take energy from solar panel
  while(n==0)
  { if((Ipmax>=15)&&(Vpmax>=112.5)) //1st rule of fuzzy algorithm
    { printf("Motor take energy from solar panel at %.2fh\n",t);
      n=n+1;
    }
    t=t+T;
    simfuz2();
  }

/*****/
//Compute time and quantity batt for charge batt 1st group and supply DC motor
  while(n==1)
  { if((Ipmax>=25)&&(Ipmax<35)&&(Vpmax>=112.5)&&(Vpmax<127.5)) //2nd rule of
fuzzy algorithm
    { Gbatt=8;//Quantity battery per group
      Vpmax=Gbatt*Vstrfull;
      printf("Batt group %d have %d batts in series charge start at time %.2fh\n",n,Gbatt,t);
    }
  }
}

```

```

        printf("Which I,V,P for supply batt and motor = %.2fA,%.2fV,%.0fW
respectively\n",Ipmax,Vpmax,Ipmax*Vpmax);
        Nbatt=Gbatt;//totally battery
        fitimeccc[n]=t+CCC; //Final time on CCC of batt group n
        n=n+1;
    }
    if((Ipmax>=25)&&(Ipmax<35)&&(Vpmax>=127.5)&&(Vpmax<142.5)) //3rd rule of fuzzy
algorithm
    {
        Gbatt=9;
        Vpmax=Gbatt*Vstrfull;
        printf("Batt group %d have %d batts in series charge start at time %.2fh\n",n,Gbatt,t);
        printf("Which I,V,P for supply batt and motor = %.2fA,%.2fV,%.0fW
respectively\n",Ipmax,Vpmax,Ipmax*Vpmax);
        Nbatt=Gbatt;
        fitimeccc[n]=t+CCC;
        n=n+1;
    }
    if((Ipmax>=25)&&(Ipmax<35)&&(Vpmax>=142.5))//4th rule of fuzzy algorithm
    {
        Gbatt=10;
        Vpmax=Gbatt*Vstrfull;
        printf("Batt group %d have %d batts in series charge start at time %.2fh\n",n,Gbatt,t);
        printf("Which I,V,P for supply batt and motor = %.2fA,%.2fV,%.0fW
respectively\n",Ipmax,Vpmax,Ipmax*Vpmax);
        Nbatt=Gbatt;
        fitimeccc[n]=t+CCC;
        n=n+1;
    }
    t=t+T;
    simfuz2();
}

/*****/
//Compute time and quantity batt for charge batt 2nd group and supply DC motor
//Batt 2nd group charge start on CCC of batt 1st group
while((n==2)&&(t<=fitimeccc[j]))
{
    if((Ipmax>=45)&&(Ipmax<55)&&(Vpmax>=112.5)&&(Vpmax<127.5)) //5th rule of fuzzy
algorithm
    {
        Gbatt=8;
        Vpmax=Gbatt*Vstrfull;
        printf("Batt group %d have %d batts in series charge start at time %.2fh\n",n,Gbatt,t);
        printf("Which I,V,P for supply batt and motor = %.2fA,%.2fV,%.0fW
respectively\n",Ipmax,Vpmax,Ipmax*Vpmax);
        Nbatt=Nbatt+Gbatt;
        fitimeccc[n]=t+CCC;
        n=n+1;
    }
    if((Ipmax>=45)&&(Ipmax<55)&&(Vpmax>=127.5)&&(Vpmax<142.5)) //6th rule of fuzzy
algorithm
    {
        Gbatt=9;
        Vpmax=Gbatt*Vstrfull;
        printf("Batt group %d have %d batts in series charge start at time %.2fh\n",n,Gbatt,t);
        printf("Which I,V,P for supply batt and motor = %.2fA,%.2fV,%.0fW
respectively\n",Ipmax,Vpmax,Ipmax*Vpmax);
        Nbatt=Nbatt+Gbatt;
        fitimeccc[n]=t+CCC;
        n=n+1;
    }
}

```

```

if((Ipmax>=45)&&(Ipmax<55)&&(Vpmax>=142.5))//7th rule of fuzzy algorithm
{
  Gbatt=10;
  Vpmax=Gbatt*Vstrfull;
  printf("Batt group %d have %d batts in series charge start at time %.2fh\n",n,Gbatt,t);
  printf("Which I,V,P for supply batt and motor = %.2fA,%.2fV,%.0fW
respectively\n",Ipmax,Vpmax,Ipmax*Vpmax);
  Nbatt=Nbatt+Gbatt;
  fitimeccc[n]=t+CCC;
  n=n+1;
}
t=t+T;
simfuz2();
}
//Batt 2nd group charge start on CVC of batt 1st group
while((n==2)&&(t>fitimeccc[j]))
{
  m=j;
  if(((Ipmax>=25)&&(Ipmax<35)&&(Ireq>=25)&&(Ireq<35))||((Ipmax>=35)&&(Ipmax
<45)&&(Ireq>=35)&&(Ireq<45))||((Ipmax>=45)&&(Ipmax<55)&&(Ireq>=45)&&(Ireq<55)))&&
(Vpmax>=112.5)&&(Vpmax<127.5)) //8th rule of fuzzy algorithm
  {
    Gbatt=8;
    Vpmax=Gbatt*Vstrfull;
    printf("Batt group %d have %d batts in series charge start at time %.2fh\n",n,Gbatt,t);
    printf("Which I,V,P for supply batt and motor = %.2fA,%.2fV,%.0fW
respectively\n",Ipmax,Vpmax,Ipmax*Vpmax);
    Nbatt=Nbatt+Gbatt;
    fitimeccc[n]=t+CCC;
    n=n+1;
  }
  if(((Ipmax>=25)&&(Ipmax<35)&&(Ireq>=25)&&(Ireq<35))||((Ipmax>=35)&&(Ipmax
<45)&&(Ireq>=35)&&(Ireq<45))||((Ipmax>=45)&&(Ipmax<55)&&(Ireq>=45)&&(Ireq<55)))&&
(Vpmax>=127.5)&&(Vpmax<142.5)) //9th rule of fuzzy algorithm
  {
    Gbatt=9;
    Vpmax=Gbatt*Vstrfull;
    printf("Batt group %d have %d batts in series charge start at time %.2fh\n",n,Gbatt,t);
    printf("Which I,V,P for supply batt and motor = %.2fA,%.2fV,%.0fW
respectively\n",Ipmax,Vpmax,Ipmax*Vpmax);
    Nbatt=Nbatt+Gbatt;
    fitimeccc[n]=t+CCC;
    n=n+1;
  }
  if(((Ipmax>=25)&&(Ipmax<35)&&(Ireq>=25)&&(Ireq<35))||((Ipmax>=35)&&(Ipmax
<45)&&(Ireq>=35)&&(Ireq<45))||((Ipmax>=45)&&(Ipmax<55)&&(Ireq>=45)&&(Ireq<55)))&&
(Vpmax>=142.5)) //10th rule of fuzzy algorithm
  {
    Gbatt=10;
    Vpmax=Gbatt*Vstrfull;
    printf("Batt group %d have %d batts in series charge start at time %.2fh\n",n,Gbatt,t);
    printf("Which I,V,P for supply batt and motor = %.2fA,%.2fV,%.0fW
respectively\n",Ipmax,Vpmax,Ipmax*Vpmax);
    Nbatt=Nbatt+Gbatt;
    fitimeccc[n]=t+CCC;
    n=n+1;
  }
t=t+T;
simfuz2();
simfuz3();
}

```

```

/*****/
//Compute time and quantity batt for charge batt 3rd group and supply DC motor
//Batt 3rd group charge start on CCC of batt 1st and 2nd group
while((n==3)&&(t<=fitimeccc[j]))
{
  if((Ipmax>=65)&&(Ipmax<75)&&(Vpmax>=112.5)&&(Vpmax<127.5)) //11th rule of
  fuzzy algorithm
  {
    Gbatt=8;
    Vpmax=Gbatt*Vstrfull;
    printf("Batt group %d have %d batts in series charge start at time %.2fh\n",n,Gbatt,t);
    printf("Which I,V,P for supply batt and motor = %.2fA,%.2fV,%.0fW
    respectively\n",Ipmax,Vpmax,Ipmax*Vpmax);
    Nbatt=Nbatt+Gbatt;
    fitimeccc[n]=t+CCC;
    n=n+1;
  }
  if((Ipmax>=65)&&(Ipmax<75)&&(Vpmax>=127.5)&&(Vpmax<142.5)) //12th rule of
  fuzzy algorithm
  {
    Gbatt=9;
    Vpmax=Gbatt*Vstrfull;
    printf("Batt group %d have %d batts in series charge start at time %.2fh\n",n,Gbatt,t);
    printf("Which I,V,P for supply batt and motor = %.2fA,%.2fV,%.0fW
    respectively\n",Ipmax,Vpmax,Ipmax*Vpmax);
    Nbatt=Nbatt+Gbatt;
    fitimeccc[n]=t+CCC;
    n=n+1;
  }
  if((Ipmax>=65)&&(Ipmax<75)&&(Vpmax>=142.5))//13th rule of fuzzy algorithm
  {
    Gbatt=10;
    Vpmax=Gbatt*Vstrfull;
    printf("Batt group %d have %d batts in series charge start at time %.2fh\n",n,Gbatt,t);
    printf("Which I,V,P for supply batt and motor = %.2fA,%.2fV,%.0fW
    respectively\n",Ipmax,Vpmax,Ipmax*Vpmax);
    Nbatt=Nbatt+Gbatt;
    fitimeccc[n]=t+CCC;
    n=n+1;
  }
  t=t+T;
  simfuz2();
}
//Batt 3rd group charge start between on CVC of batt 1st group and CCC of batt 2nd group
while((n==3)&&(t>fitimeccc[j])&&(t<=fitimeccc[j+1]))
{
  m=j;
  if((((Ipmax>=45)&&(Ipmax<55)&&(Ireq>=45)&&(Ireq<55))||((Ipmax>=55)&&(Ipmax
  <65)&&(Ireq>=55)&&(Ireq<65))||((Ipmax>=65)&&(Ipmax<75)&&(Ireq>=65)&&(Ireq<75)))&&
  (Vpmax>=112.5)&&(Vpmax<127.5)) //14th rule of fuzzy algorithm
  {
    Gbatt=8;
    Vpmax=Gbatt*Vstrfull;
    printf("Batt group %d have %d batts in series charge start at time %.2fh\n",n,Gbatt,t);
    printf("Which I,V,P for supply batt and motor = %.2fA,%.2fV,%.0fW
    respectively\n",Ipmax,Vpmax,Ipmax*Vpmax);
    Nbatt=Nbatt+Gbatt;
    fitimeccc[n]=t+CCC;
    n=n+1;
  }
  if((((Ipmax>=45)&&(Ipmax<55)&&(Ireq>=45)&&(Ireq<55))||((Ipmax>=55)&&(Ipmax
  <65)&&(Ireq>=55)&&(Ireq<65))||((Ipmax>=65)&&(Ipmax<75)&&(Ireq>=65)&&(Ireq<75)))&&
  (Vpmax>=127.5)&&(Vpmax<142.5)) //15th rule of fuzzy algorithm

```

```

    {   Gbatt=9;
        Vpmax=Gbatt*Vstrfull;
        printf("Batt group %d have %d batts in series charge start at time %.2fh\n",n,Gbatt,t);
        printf("Which I,V,P for supply batt and motor = %.2fA,%.2fV,%.0fW
respectively\n",Ipmax,Vpmax,Ipmax*Vpmax);
        Nbatt=Nbatt+Gbatt;
        fitimeccc[n]=t+CCC;
        n=n+1;
    }
    if((((Ipmax>=45)&&(Ipmax<55)&&(Ireq>=45)&&(Ireq<55))||((Ipmax>=55)&&(Ipmax
<65)&&(Ireq>=55)&&(Ireq<65))||((Ipmax>=65)&&(Ipmax<75)&&(Ireq>=65)&&(Ireq<75)))&&
(Vpmax>=142.5)) //16th rule of fuzzy algorithm
    {   Gbatt=10;
        Vpmax=Gbatt*Vstrfull;
        printf("Batt group %d have %d batts in series charge start at time %.2fh\n",n,Gbatt,t);
        printf("Which I,V,P for supply batt and motor = %.2fA,%.2fV,%.0fW
respectively\n",Ipmax,Vpmax,Ipmax*Vpmax);
        Nbatt=Nbatt+Gbatt;
        fitimeccc[n]=t+CCC;
        n=n+1;
    }
    t=t+T;
    simfuz2();
    simfuz3();
}
//Batt 3rd group charge start on CVC of batt 1st and 2nd group
while((n==3)&&(t>fitimeccc[j+1]))
{   m=j+1;
    if((((Ipmax>=25)&&(Ipmax<35)&&(Ireq>=25)&&(Ireq<35))||((Ipmax>=35)&&(Ipmax
<45)&&(Ireq>=35)&&(Ireq<45))||((Ipmax>=45)&&(Ipmax<55)&&(Ireq>=45)&&(Ireq<55))||
((Ipmax>=55)&&(Ipmax<65)&&(Ireq>=55)&&(Ireq<65))||((Ipmax>=65)&&(Ipmax<75)&&
(Ireq>=65)&&(Ireq<75)))&&(Vpmax>=112.5)&&(Vpmax<127.5)) //17th rule of fuzzy
algorithm
    {   Gbatt=8;
        Vpmax=Gbatt*Vstrfull;
        printf("Batt group %d have %d batts in series charge start at time %.2fh\n",n,Gbatt,t);
        printf("Which I,V,P for supply batt and motor = %.2fA,%.2fV,%.0fW
respectively\n",Ipmax,Vpmax,Ipmax*Vpmax);
        Nbatt=Nbatt+Gbatt;
        fitimeccc[n]=t+CCC;
        n=n+1;
    }
    if((((Ipmax>=25)&&(Ipmax<35)&&(Ireq>=25)&&(Ireq<35))||((Ipmax>=35)&&(Ipmax
<45)&&(Ireq>=35)&&(Ireq<45))||((Ipmax>=45)&&(Ipmax<55)&&(Ireq>=45)&&(Ireq<55))||
((Ipmax>=55)&&(Ipmax<65)&&(Ireq>=55)&&(Ireq<65))||((Ipmax>=65)&&(Ipmax<75)&&
(Ireq>=65)&&(Ireq<75)))&&(Vpmax>=127.5)&&(Vpmax<142.5)) //18th rule of fuzzy
algorithm
    {   Gbatt=9;
        Vpmax=Gbatt*Vstrfull;
        printf("Batt group %d have %d batts in series charge start at time %.2fh\n",n,Gbatt,t);
        printf("Which I,V,P for supply batt and motor = %.2fA,%.2fV,%.0fW
respectively\n",Ipmax,Vpmax,Ipmax*Vpmax);
        Nbatt=Nbatt+Gbatt;
        fitimeccc[n]=t+CCC;
        n=n+1;
    }
}

```

```

        if((((Ipmax>=25)&&(Ipmax<35)&&(Ireq>=25)&&(Ireq<35))||((Ipmax>=35)&&(Ipmax
<45)&&(Ireq>=35)&&(Ireq<45))||((Ipmax>=45)&&(Ipmax<55)&&(Ireq>=45)&&(Ireq<55))||
((Ipmax>=55)&&(Ipmax<65)&&(Ireq>=55)&&(Ireq<65))||((Ipmax>=65)&&(Ipmax<75)&&
(Ireq>=65)&&(Ireq<75)))&&(Vpmax>=142.5)) //19th rule of fuzzy algorithm
    {   Gbatt=10;
        Vpmax=Gbatt*Vstrfull;
        printf("Batt group %d have %d batts in series charge start at time %.2fh\n",n,Gbatt,t);
        printf("Which I,V,P for supply batt and motor = %.2fA,%.2fV,%.0fW
respectively\n",Ipmax,Vpmax,Ipmax*Vpmax);
        Nbatt=Nbatt+Gbatt;
        fitimeccc[n]=t+CCC;
        n=n+1;
    }
    t=t+T;
    simfuz2();
    simfuz3();
}

/*****/
//Compute time and quantity batt for charge batt 4th group and supply DC motor
//Batt 4th group charge start on CCC of batt 1st,2nd and 3rd group
while((n==4)&&(t<=fitimeccc[j]))
{   if((Ipmax>=75)&&(Ipmax<85)&&(Vpmax>=112.5)&&(Vpmax<127.5)) //20th rule of
fuzzy algorithm
    {   Gbatt=8;
        Vpmax=Gbatt*Vstrfull;
        printf("Batt group %d have %d batts in series charge start at time %.2fh\n",n,Gbatt,t);
        printf("Which I,V,P for supply batt and motor = %.2fA,%.2fV,%.0fW
respectively\n",Ipmax,Vpmax,Ipmax*Vpmax);
        Nbatt=Nbatt+Gbatt;
        fitimeccc[n]=t+CCC;
        n=n+1;
    }
    if((Ipmax>=75)&&(Ipmax<85)&&(Vpmax>=127.5)&&(Vpmax<142.5)) //21th rule of
fuzzy algorithm
    {   Gbatt=9;
        Vpmax=Gbatt*Vstrfull;
        printf("Batt group %d have %d batts in series charge start at time %.2fh\n",n,Gbatt,t);
        printf("Which I,V,P for supply batt and motor = %.2fA,%.2fV,%.0fW
respectively\n",Ipmax,Vpmax,Ipmax*Vpmax);
        Nbatt=Nbatt+Gbatt;
        fitimeccc[n]=t+CCC;
        n=n+1;
    }
    if((Ipmax>=75)&&(Ipmax<85)&&(Vpmax>=142.5))//22th rule of fuzzy algorithm
    {   Gbatt=10;
        Vpmax=Gbatt*Vstrfull;
        printf("Batt group %d have %d batts in series charge start at time %.2fh\n",n,Gbatt,t);
        printf("Which I,V,P for supply batt and motor = %.2fA,%.2fV,%.0fW
respectively\n",Ipmax,Vpmax,Ipmax*Vpmax);
        Nbatt=Nbatt+Gbatt;
        fitimeccc[n]=t+CCC;
        n=n+1;
    }
    t=t+T;
    simfuz2();
}

```

```

//Batt 4th group charge start between on CVC of batt 1st group and CCC of batt 2nd and 3rd group
while((n==4)&&(t>fitimeccc[j])&&(t<=fitimeccc[j+1]))
{
  m=j;
  if((((Ipmax>=65)&&(Ipmax<75)&&(Ireq>=65)&&(Ireq<75))||((Ipmax>=75)&&(Ipmax
<85)&&(Ireq>=75)&&(Ireq<85)))&&(Vpmax>=112.5)&&(Vpmax<127.5)) //23th rule of
fuzzy algorithm
  {
    Gbatt=8;
    Vpmax=Gbatt*Vstrfull;
    printf("Batt group %d have %d batts in series charge start at time %.2fh\n",n,Gbatt,t);
    printf("Which I,V,P for supply batt and motor = %.2fA,%.2fV,%.0fW
respectively\n",Ipmax,Vpmax,Ipmax*Vpmax);
    Nbatt=Nbatt+Gbatt;
    fitimeccc[n]=t+CCC;
    n=n+1;
  }
  if((((Ipmax>=65)&&(Ipmax<75)&&(Ireq>=65)&&(Ireq<75))||((Ipmax>=75)&&(Ipmax
<85)&&(Ireq>=75)&&(Ireq<85)))&&(Vpmax>=127.5)&&(Vpmax<142.5)) //24th rule of
fuzzy algorithm
  {
    Gbatt=9;
    Vpmax=Gbatt*Vstrfull;
    printf("Batt group %d have %d batts in series charge start at time %.2fh\n",n,Gbatt,t);
    printf("Which I,V,P for supply batt and motor = %.2fA,%.2fV,%.0fW
respectively\n",Ipmax,Vpmax,Ipmax*Vpmax);
    Nbatt=Nbatt+Gbatt;
    fitimeccc[n]=t+CCC;
    n=n+1;
  }
  if((((Ipmax>=65)&&(Ipmax<75)&&(Ireq>=65)&&(Ireq<75))||((Ipmax>=75)&&(Ipmax
<85)&&(Ireq>=75)&&(Ireq<85)))&&(Vpmax>=142.5)) //25th rule of fuzzy algorithm
  {
    Gbatt=10;
    Vpmax=Gbatt*Vstrfull;
    printf("Batt group %d have %d batts in series charge start at time %.2fh\n",n,Gbatt,t);
    printf("Which I,V,P for supply batt and motor = %.2fA,%.2fV,%.0fW
respectively\n",Ipmax,Vpmax,Ipmax*Vpmax);
    Nbatt=Nbatt+Gbatt;
    fitimeccc[n]=t+CCC;
    n=n+1;
  }
}
t=t+T;
simfuz2();
simfuz3();
}
//Batt 4th group charge start between on CVC of batt 1st and 2nd group and CCC of batt 3rd group
while((n==4)&&(t>fitimeccc[j+1])&&(t<=fitimeccc[j+2]))
{
  m=j+1;
  if((((Ipmax>=45)&&(Ipmax<55)&&(Ireq>=45)&&(Ireq<55))||((Ipmax>=55)&&(Ipmax
<65)&&(Ireq>=55)&&(Ireq<65))||((Ipmax>=65)&&(Ipmax<75)&&(Ireq>=65)&&(Ireq<75))||
((Ipmax>=75)&&(Ipmax<85)&&(Ireq>=75)&&(Ireq<85)))&&(Vpmax>=112.5)&&(Vpmax
<127.5))//26th rule of fuzzy algorithm
  {
    Gbatt=8;
    Vpmax=Gbatt*Vstrfull;
    printf("Batt group %d have %d batts in series charge start at time %.2fh\n",n,Gbatt,t);
    printf("Which I,V,P for supply batt and motor = %.2fA,%.2fV,%.0fW
respectively\n",Ipmax,Vpmax,Ipmax*Vpmax);
  }
}

```

```

        Nbatt=Nbatt+Gbatt;
        fitimeccc[n]=t+CCC;
        n=n+1;
    }
    if((((Ipmax>=45)&&(Ipmax<55)&&(Ireq>=45)&&(Ireq<55))||((Ipmax>=55)&&(Ipmax
<65)&&(Ireq>=55)&&(Ireq<65))||((Ipmax>=65)&&(Ipmax<75)&&(Ireq>=65)&&(Ireq<75))||
((Ipmax>=75)&&(Ipmax<85)&&(Ireq>=75)&&(Ireq<85)))&&(Vpmax>=127.5)&&(Vpmax
<142.5))//27th rule of fuzzy algorithm
    {
        Gbatt=9;
        Vpmax=Gbatt*Vstrfull;
        printf("Batt group %d have %d batts in series charge start at time %.2fh\n",n,Gbatt,t);
        printf("Which I,V,P for supply batt and motor = %.2fA,%.2fV,%.0fW
respectively\n",Ipmax,Vpmax,Ipmax*Vpmax);
        Nbatt=Nbatt+Gbatt;
        fitimeccc[n]=t+CCC;
        n=n+1;
    }
    if((((Ipmax>=45)&&(Ipmax<55)&&(Ireq>=45)&&(Ireq<55))||((Ipmax>=55)&&(Ipmax
<65)&&(Ireq>=55)&&(Ireq<65))||((Ipmax>=65)&&(Ipmax<75)&&(Ireq>=65)&&(Ireq<75))||
((Ipmax>=75)&&(Ipmax<85)&&(Ireq>=75)&&(Ireq<85)))&&(Vpmax>=142.5) //28th rule of
fuzzy algorithm
    {
        Gbatt=10;
        Vpmax=Gbatt*Vstrfull;
        printf("Batt group %d have %d batts in series charge start at time %.2fh\n",n,Gbatt,t);
        printf("Which I,V,P for supply batt and motor = %.2fA,%.2fV,%.0fW
respectively\n",Ipmax,Vpmax,Ipmax*Vpmax);
        Nbatt=Nbatt+Gbatt;
        fitimeccc[n]=t+CCC;
        n=n+1;
    }
}
t=t+T;
simfuz2();
simfuz3();
}
//Batt 4th group charge start on CVC of batt 1st,2nd and 3rd group
while((n==4)&&(t>fitimeccc[j+2]))
{
    m=j+2;
    if((((Ipmax>=25)&&(Ipmax<35)&&(Ireq>=25)&&(Ireq<35))||((Ipmax>=35)&&(Ipmax
<45)&&(Ireq>=35)&&(Ireq<45))||((Ipmax>=45)&&(Ipmax<55)&&(Ireq>=45)&&(Ireq<55))||
((Ipmax>=55)&&(Ipmax<65)&&(Ireq>=55)&&(Ireq<65))||((Ipmax>=65)&&(Ipmax<75)&&
(Ireq>=65)&&(Ireq<75))||((Ipmax>=75)&&(Ipmax<85)&&(Ireq>=75)&&(Ireq<85)))&&
(Vpmax>=112.5)&&(Vpmax<127.5) //29th rule of fuzzy algorithm
    {
        Gbatt=8;
        Vpmax=Gbatt*Vstrfull;
        printf("Batt group %d have %d batts in series charge start at time %.2fh\n",n,Gbatt,t);
        printf("Which I,V,P for supply batt and motor = %.2fA,%.2fV,%.0fW
respectively\n",Ipmax,Vpmax,Ipmax*Vpmax);
        Nbatt=Nbatt+Gbatt;
        fitimeccc[n]=t+CCC;
        n=n+1;
    }
    if((((Ipmax>=25)&&(Ipmax<35)&&(Ireq>=25)&&(Ireq<35))||((Ipmax>=35)&&(Ipmax
<45)&&(Ireq>=35)&&(Ireq<45))||((Ipmax>=45)&&(Ipmax<55)&&(Ireq>=45)&&(Ireq<55))||
((Ipmax>=55)&&(Ipmax<65)&&(Ireq>=55)&&(Ireq<65))||((Ipmax>=65)&&(Ipmax<75)&&
(Ireq>=65)&&(Ireq<75))||((Ipmax>=75)&&(Ipmax<85)&&(Ireq>=75)&&(Ireq<85)))&&
(Vpmax>=127.5)&&(Vpmax<142.5) //30th rule of fuzzy algorithm
    {
        Gbatt=9;

```



```

        Vpmax=Gbatt*Vstrfull;
        printf("Batt group %d have %d batts in series charge start at time %.2fh\n",n,Gbatt,t);
        printf("Which I,V,P for supply batt and motor = %.2fA,%.2fV,%.0fW
respectively\n",Ipmax,Vpmax,Ipmax*Vpmax);
        Nbatt=Nbatt+Gbatt;
        fitimeccc[n]=t+CCC;
        n=n+1;
    }
    if((((Ipmax>=25)&&(Ipmax<35)&&(Ireq>=25)&&(Ireq<35))||((Ipmax>=35)&&(Ipmax
<45)&&(Ireq>=35)&&(Ireq<45))||((Ipmax>=45)&&(Ipmax<55)&&(Ireq>=45)&&(Ireq<55))||
((Ipmax>=55)&&(Ipmax<65)&&(Ireq>=55)&&(Ireq<65))||((Ipmax>=65)&&(Ipmax<75)&&
(Ireq>=65)&&(Ireq<75))||((Ipmax>=75)&&(Ipmax<85)&&(Ireq>=75)&&(Ireq<85)))&&
(Vpmax>=142.5)) //31th rule of fuzzy algorithm
    {
        Gbatt=10;
        Vpmax=Gbatt*Vstrfull;
        printf("Batt group %d have %d batts in series charge start at time %.2fh\n",n,Gbatt,t);
        printf("Which I,V,P for supply batt and motor = %.2fA,%.2fV,%.0fW
respectively\n",Ipmax,Vpmax,Ipmax*Vpmax);
        Nbatt=Nbatt+Gbatt;
        fitimeccc[n]=t+CCC;
        n=n+1;
    }
    t=t+T;
    simfuz2();
    simfuz3();
}

/*****/
//Compute time and quantity batt for charge batt 5th group and supply DC motor
//Batt 5th group charge start on CCC of batt 1st,2nd,3rd and 4th group
while((n==5)&&(t<=fitimeccc[j]))
{
    if((Ipmax>=95)&&(Ipmax<105)&&(Vpmax>=112.5)&&(Vpmax<127.5)) //32th rule of
fuzzy algorithm
    {
        Gbatt=8;
        Vpmax=Gbatt*Vstrfull;
        printf("Batt group %d have %d batts in series charge start at time %.2fh\n",n,Gbatt,t);
        printf("Which I,V,P for supply batt and motor = %.2fA,%.2fV,%.0fW
respectively\n",Ipmax,Vpmax,Ipmax*Vpmax);
        Nbatt=Nbatt+Gbatt;
        fitimeccc[n]=t+CCC;
        n=n+1;
    }
    if((Ipmax>=95)&&(Ipmax<105)&&(Vpmax>=127.5)&&(Vpmax<142.5)) //33th rule of
fuzzy algorithm
    {
        Gbatt=9;
        Vpmax=Gbatt*Vstrfull;
        printf("Batt group %d have %d batts in series charge start at time %.2fh\n",n,Gbatt,t);
        printf("Which I,V,P for supply batt and motor = %.2fA,%.2fV,%.0fW
respectively\n",Ipmax,Vpmax,Ipmax*Vpmax);
        Nbatt=Nbatt+Gbatt;
        fitimeccc[n]=t+CCC;
        n=n+1;
    }
    if((Ipmax>=95)&&(Ipmax<105)&&(Vpmax>=142.5)) //34th rule of fuzzy algorithm
    {
        Gbatt=10;
        Vpmax=Gbatt*Vstrfull;
        printf("Batt group %d have %d batts in series charge start at time %.2fh\n",n,Gbatt,t);

```

```

        printf("Which I,V,P for supply batt and motor = %.2fA,%.2fV,%.0fW
respectively\n",Ipmax,Vpmax,Ipmax*Vpmax);
        Nbatt=Nbatt+Gbatt;
        fitimeccc[n]=t+CCC;
        n=n+1;
    }
    t=t+T;
    simfuz2();
}
//Batt 5th group charge start between on CVC of batt 1st group and CCC of batt 2nd,3rd and 4th group
while((n==5)&&(t>fitimeccc[j])&&(t<=fitimeccc[j+1]))
{
    m=j;
    if((((Ipmax>=75)&&(Ipmax<85)&&(Ireq>=75)&&(Ireq<85))||((Ipmax>=85)&&(Ipmax
<95)&&(Ireq>=85)&&(Ireq<95))||((Ipmax>=95)&&(Ipmax<105)&&(Ireq>=95)&&(Ireq
<105)))&&(Vpmax>=112.5)&&(Vpmax<127.5)) //35th rule of fuzzy algorithm
    {
        Gbatt=8;
        Vpmax=Gbatt*Vstrfull;
        printf("Batt group %d have %d batts in series charge start at time %.2fh\n",n,Gbatt,t);
        printf("Which I,V,P for supply batt and motor = %.2fA,%.2fV,%.0fW
respectively\n",Ipmax,Vpmax,Ipmax*Vpmax);
        Nbatt=Nbatt+Gbatt;
        fitimeccc[n]=t+CCC;
        n=n+1;
    }
    if((((Ipmax>=75)&&(Ipmax<85)&&(Ireq>=75)&&(Ireq<85))||((Ipmax>=85)&&(Ipmax
<95)&&(Ireq>=85)&&(Ireq<95))||((Ipmax>=95)&&(Ipmax<105)&&(Ireq>=95)&&(Ireq
<105)))&&(Vpmax>=127.5)&&(Vpmax<142.5)) //36th rule of fuzzy algorithm
    {
        Gbatt=9;
        Vpmax=Gbatt*Vstrfull;
        printf("Batt group %d have %d batts in series charge start at time %.2fh\n",n,Gbatt,t);
        printf("Which I,V,P for supply batt and motor = %.2fA,%.2fV,%.0fW
respectively\n",Ipmax,Vpmax,Ipmax*Vpmax);
        Nbatt=Nbatt+Gbatt;
        fitimeccc[n]=t+CCC;
        n=n+1;
    }
    if((((Ipmax>=75)&&(Ipmax<85)&&(Ireq>=75)&&(Ireq<85))||((Ipmax>=85)&&(Ipmax
<95)&&(Ireq>=85)&&(Ireq<95))||((Ipmax>=95)&&(Ipmax<105)&&(Ireq>=95)&&(Ireq
<105)))&&(Vpmax>=142.5)) //37th rule of fuzzy algorithm
    {
        Gbatt=10;
        Vpmax=Gbatt*Vstrfull;
        printf("Batt group %d have %d batts in series charge start at time %.2fh\n",n,Gbatt,t);
        printf("Which I,V,P for supply batt and motor = %.2fA,%.2fV,%.0fW
respectively\n",Ipmax,Vpmax,Ipmax*Vpmax);
        Nbatt=Nbatt+Gbatt;
        fitimeccc[n]=t+CCC;
        n=n+1;
    }
}
t=t+T;
simfuz2();
simfuz3();
}

```

```

//Batt 5th group charge start between on CVC of batt 1st and 2nd group and CCC of batt 3rd and 4th
group
while((n==5)&&(t>fitimeccc[j+1])&&(t<=fitimeccc[j+2]))
{
  m=j+1;
  if((((Ipmax>=65)&&(Ipmax<75)&&(Ireq>=65)&&(Ireq<75))||((Ipmax>=75)&&(Ipmax
<85)&&(Ireq>=75)&&(Ireq<85))||((Ipmax>=85)&&(Ipmax<95)&&(Ireq>=85)&&(Ireq<95))||
((Ipmax>=95)&&(Ipmax<105)&&(Ireq>=95)&&(Ireq<105)))&&(Vpmax>=112.5)&&(Vpmax
<127.5))//38th rule of fuzzy algorithm
  {
    Gbatt=8;
    Vpmax=Gbatt*Vstrfull;
    printf("Batt group %d have %d batts in series charge start at time %.2fh\n",n,Gbatt,t);
    printf("Which I,V,P for supply batt and motor = %.2fA,%.2fV,%.0fW
respectively\n",Ipmax,Vpmax,Ipmax*Vpmax);
    Nbatt=Nbatt+Gbatt;
    fitimeccc[n]=t+CCC;
    n=n+1;
  }
  if((((Ipmax>=65)&&(Ipmax<75)&&(Ireq>=65)&&(Ireq<75))||((Ipmax>=75)&&(Ipmax
<85)&&(Ireq>=75)&&(Ireq<85))||((Ipmax>=85)&&(Ipmax<95)&&(Ireq>=85)&&(Ireq<95))||
((Ipmax>=95)&&(Ipmax<105)&&(Ireq>=95)&&(Ireq<105)))&&(Vpmax>=127.5)&&(Vpmax
<142.5))//39th rule of fuzzy algorithm
  {
    Gbatt=9;
    Vpmax=Gbatt*Vstrfull;
    printf("Batt group %d have %d batts in series charge start at time %.2fh\n",n,Gbatt,t);
    printf("Which I,V,P for supply batt and motor = %.2fA,%.2fV,%.0fW
respectively\n",Ipmax,Vpmax,Ipmax*Vpmax);
    Nbatt=Nbatt+Gbatt;
    fitimeccc[n]=t+CCC;
    n=n+1;
  }
  if((((Ipmax>=65)&&(Ipmax<75)&&(Ireq>=65)&&(Ireq<75))||((Ipmax>=75)&&(Ipmax
<85)&&(Ireq>=75)&&(Ireq<85))||((Ipmax>=85)&&(Ipmax<95)&&(Ireq>=85)&&(Ireq<95))||
((Ipmax>=95)&&(Ipmax<105)&&(Ireq>=95)&&(Ireq<105)))&&(Vpmax>=142.5)) //40th rule of
fuzzy algorithm
  {
    Gbatt=10;
    Vpmax=Gbatt*Vstrfull;
    printf("Batt group %d have %d batts in series charge start at time %.2fh\n",n,Gbatt,t);
    printf("Which I,V,P for supply batt and motor = %.2fA,%.2fV,%.0fW
respectively\n",Ipmax,Vpmax,Ipmax*Vpmax);
    Nbatt=Nbatt+Gbatt;
    fitimeccc[n]=t+CCC;
    n=n+1;
  }
  }
  t=t+T;
  simfuz2();
  simfuz3();
}
//Batt 5th group charge start between on CVC of batt 1st,2nd and 3rd group and CCC of batt 4th group
while((n==5)&&(t>fitimeccc[j+2])&&(t<=fitimeccc[j+3]))
{
  m=j+2;
  if((((Ipmax>=45)&&(Ipmax<55)&&(Ireq>=45)&&(Ireq<55))||((Ipmax>=55)&&(Ipmax
<65)&&(Ireq>=55)&&(Ireq<65))||((Ipmax>=65)&&(Ipmax<75)&&(Ireq>=65)&&(Ireq<75))||
((Ipmax>=75)&&(Ipmax<85)&&(Ireq>=75)&&(Ireq<85))||((Ipmax>=85)&&(Ipmax<95)&&
(Ireq>=85)&&(Ireq<95))||((Ipmax>=95)&&(Ipmax<105)&&(Ireq>=95)&&(Ireq<105)))&&
(Vpmax>=112.5)&&(Vpmax<127.5)) //41th rule of fuzzy algorithm
  {
    Gbatt=8;
    Vpmax=Gbatt*Vstrfull;

```

```

    printf("Batt group %d have %d batts in series charge start at time %.2fh\n",n,Gbatt,t);
    printf("Which I,V,P for supply batt and motor = %.2fA,%.2fV,%.0fW
respectively\n",Ipmax,Vpmax,Ipmax*Vpmax);
    Nbatt=Nbatt+Gbatt;
    fitimeccc[n]=t+CCC;
    n=n+1;
}
if((((Ipmax>=45)&&(Ipmax<55)&&(Ireq>=45)&&(Ireq<55))||((Ipmax>=55)&&(Ipmax
<65)&&(Ireq>=55)&&(Ireq<65))||((Ipmax>=65)&&(Ipmax<75)&&(Ireq>=65)&&(Ireq<75))||
((Ipmax>=75)&&(Ipmax<85)&&(Ireq>=75)&&(Ireq<85))||((Ipmax>=85)&&(Ipmax<95)&&
(Ireq>=85)&&(Ireq<95))||((Ipmax>=95)&&(Ipmax<105)&&(Ireq>=95)&&(Ireq<105)))&&
(Vpmax>=127.5)&&(Vpmax<142.5)) //42th rule of fuzzy algorithm
{
    Gbatt=9;
    Vpmax=Gbatt*Vstrfull;
    printf("Batt group %d have %d batts in series charge start at time %.2fh\n",n,Gbatt,t);
    printf("Which I,V,P for supply batt and motor = %.2fA,%.2fV,%.0fW
respectively\n",Ipmax,Vpmax,Ipmax*Vpmax);
    Nbatt=Nbatt+Gbatt;
    fitimeccc[n]=t+CCC;
    n=n+1;
}
if((((Ipmax>=45)&&(Ipmax<55)&&(Ireq>=45)&&(Ireq<55))||((Ipmax>=55)&&(Ipmax
<65)&&(Ireq>=55)&&(Ireq<65))||((Ipmax>=65)&&(Ipmax<75)&&(Ireq>=65)&&(Ireq<75))||
((Ipmax>=75)&&(Ipmax<85)&&(Ireq>=75)&&(Ireq<85))||((Ipmax>=85)&&(Ipmax<95)&&
(Ireq>=85)&&(Ireq<95))||((Ipmax>=95)&&(Ipmax<105)&&(Ireq>=95)&&(Ireq<105)))&&
(Vpmax>=142.5)) //43th rule of fuzzy algorithm
{
    Gbatt=10;
    Vpmax=Gbatt*Vstrfull;
    printf("Batt group %d have %d batts in series charge start at time %.2fh\n",n,Gbatt,t);
    printf("Which I,V,P for supply batt and motor = %.2fA,%.2fV,%.0fW
respectively\n",Ipmax,Vpmax,Ipmax*Vpmax);
    Nbatt=Nbatt+Gbatt;
    fitimeccc[n]=t+CCC;
    n=n+1;
}
}
t=t+T;
simfuz2();
simfuz3();
}
//Batt 5th group charge start on CVC of batt 1st,2nd,3rd and 4th group
while((n==5)&&(t>fitimeccc[j+3]))
{
    m=j+3;
    if((((Ipmax>=25)&&(Ipmax<35)&&(Ireq>=25)&&(Ireq<35))||((Ipmax>=35)&&(Ipmax
<45)&&(Ireq>=35)&&(Ireq<45))||((Ipmax>=45)&&(Ipmax<55)&&(Ireq>=45)&&(Ireq<55))||
((Ipmax>=55)&&(Ipmax<65)&&(Ireq>=55)&&(Ireq<65))||((Ipmax>=65)&&(Ipmax<75)&&
(Ireq>=65)&&(Ireq<75))||((Ipmax>=75)&&(Ipmax<85)&&(Ireq>=75)&&(Ireq<85))||
((Ipmax>=85)&&(Ipmax<95)&&(Ireq>=85)&&(Ireq<95))||((Ipmax>=95)&&(Ipmax<105)&&
(Ireq>=95)&&(Ireq<105)))&&(Vpmax>=112.5)&&(Vpmax<127.5)) //44th rule of fuzzy
algorithm
    {
        Gbatt=8;
        Vpmax=Gbatt*Vstrfull;
        printf("Batt group %d have %d batts in series charge start at time %.2fh\n",n,Gbatt,t);
        printf("Which I,V,P for supply batt and motor = %.2fA,%.2fV,%.0fW
respectively\n",Ipmax,Vpmax,Ipmax*Vpmax);
    }
}

```

```

        Nbatt=Nbatt+Gbatt;
        fitimeccc[n]=t+CCC;
        n=n+1;
    }
    if((((Ipmax>=25)&&(Ipmax<35)&&(Ireq>=25)&&(Ireq<35))||((Ipmax>=35)&&(Ipmax
<45)&&(Ireq>=35)&&(Ireq<45))||((Ipmax>=45)&&(Ipmax<55)&&(Ireq>=45)&&(Ireq<55))||
((Ipmax>=55)&&(Ipmax<65)&&(Ireq>=55)&&(Ireq<65))||((Ipmax>=65)&&(Ipmax<75)&&
(Ireq>=65)&&(Ireq<75))||((Ipmax>=75)&&(Ipmax<85)&&(Ireq>=75)&&(Ireq<85))||
((Ipmax>=85)&&(Ipmax<95)&&(Ireq>=85)&&(Ireq<95))||((Ipmax>=95)&&(Ipmax<105)&&
(Ireq>=95)&&(Ireq<105)))&&(Vpmax>=127.5)&&(Vpmax<142.5)) //45th rule of fuzzy
algorithm
    {
        Gbatt=9;
        Vpmax=Gbatt*Vstrfull;
        printf("Batt group %d have %d batts in series charge start at time %.2fh\n",n,Gbatt,t);
        printf("Which I,V,P for supply batt and motor = %.2fA,%.2fV,%.0fW
respectively\n",Ipmax,Vpmax,Ipmax*Vpmax);
        Nbatt=Nbatt+Gbatt;
        fitimeccc[n]=t+CCC;
        n=n+1;
    }
    if((((Ipmax>=25)&&(Ipmax<35)&&(Ireq>=25)&&(Ireq<35))||((Ipmax>=35)&&(Ipmax
<45)&&(Ireq>=35)&&(Ireq<45))||((Ipmax>=45)&&(Ipmax<55)&&(Ireq>=45)&&(Ireq<55))||
((Ipmax>=55)&&(Ipmax<65)&&(Ireq>=55)&&(Ireq<65))||((Ipmax>=65)&&(Ipmax<75)&&
(Ireq>=65)&&(Ireq<75))||((Ipmax>=75)&&(Ipmax<85)&&(Ireq>=75)&&(Ireq<85))||
((Ipmax>=85)&&(Ipmax<95)&&(Ireq>=85)&&(Ireq<95))||((Ipmax>=95)&&(Ipmax<105)&&
(Ireq>=95)&&(Ireq<105)))&&(Vpmax>=142.5)) //46th rule of fuzzy algorithm
    {
        Gbatt=10;
        Vpmax=Gbatt*Vstrfull;
        printf("Batt group %d have %d batts in series charge start at time %.2fh\n",n,Gbatt,t);
        printf("Which I,V,P for supply batt and motor = %.2fA,%.2fV,%.0fW
respectively\n",Ipmax,Vpmax,Ipmax*Vpmax);
        Nbatt=Nbatt+Gbatt;
        fitimeccc[n]=t+CCC;
        n=n+1;
    }
    }
    t=t+T;
    simfuz2();
    simfuz3();
}

/*****/
//Compute time and quantity batt for charge batt 6th group and supply DC motor
//Know charge max 6th group every value AREA
//Batt 6th group charge start on CCC of batt 1st,2nd,3rd,4th and 5th group
while((n==6)&&(t<=fitimeccc[j]))
{
    if((Ipmax>=105)&&(Ipmax<115)&&(Vpmax>=112.5)) //47th rule of fuzzy algorithm
    {
        Gbatt=50-Nbatt;
        Vpmax=10*Vstrfull;
        printf("Batt group %d have %d batts in series charge start at time %.2fh\n",n,Gbatt,t);
        printf("Which I,V,P for supply batt and motor = %.2fA,%.2fV,%.0fW
respectively\n",Ipmax,Vpmax,Ipmax*Vpmax);
        Nbatt=Nbatt+Gbatt;
        fitimeccc[n]=t+CCC;
        n=n+1;
    }
}

```

```

        t=t+T;
        simfuz2();
    }
//Batt 6th group charge start between on CVC of batt 1st group and CCC of batt 2nd,3rd,4th and 5th
group
    while((n==6)&&(t>fitimeccc[j])&&(t<=fitimeccc[j+1]))
    {
        m=j;
        if((((Ipmax>=95)&&(Ipmax<105)&&(Ireq>=95)&&(Ireq<105))||((Ipmax>=105)&&(Ipmax
<115)&&(Ireq>=105)&&(Ireq<115)))&&(Vpmax>=112.5)) //48th rule of fuzzy algorithm
        {
            Gbatt=50-Nbatt;
            Vpmax=10*Vstrfull;
            printf("Batt group %d have %d batts in series charge start at time %.2fh\n",n,Gbatt,t);
            printf("Which I,V,P for supply batt and motor = %.2fA,%.2fV,%.0fW
respectively\n",Ipmax,Vpmax,Ipmax*Vpmax);
            Nbatt=Nbatt+Gbatt;
            fitimeccc[n]=t+CCC;
            n=n+1;
        }
        t=t+T;
        simfuz2();
        simfuz3();
    }
//Batt 6th group charge start between on CVC of batt 1st and 2nd group and CCC of batt 3rd,4th and
5th group
    while((n==6)&&(t>fitimeccc[j+1])&&(t<=fitimeccc[j+2]))
    {
        m=j+1;
        if((((Ipmax>=75)&&(Ipmax<85)&&(Ireq>=75)&&(Ireq<85))||((Ipmax>=85)&&(Ipmax
<95)&&(Ireq>=85)&&(Ireq<95))||((Ipmax>=95)&&(Ipmax<105)&&(Ireq>=95)&&(Ireq<105))||
((Ipmax>=105)&&(Ipmax<115)&&(Ireq>=105)&&(Ireq<115)))&&(Vpmax>=112.5)) //49th
rule of fuzzy algorithm
        {
            Gbatt=50-Nbatt;
            Vpmax=10*Vstrfull;
            printf("Batt group %d have %d batts in series charge start at time %.2fh\n",n,Gbatt,t);
            printf("Which I,V,P for supply batt and motor = %.2fA,%.2fV,%.0fW
respectively\n",Ipmax,Vpmax,Ipmax*Vpmax);
            Nbatt=Nbatt+Gbatt;
            fitimeccc[n]=t+CCC;
            n=n+1;
        }
        t=t+T;
        simfuz2();
        simfuz3();
    }
//Batt 6th group charge start between on CVC of batt 1st,2nd and 3rd group and CCC of batt 4th and
5th group
    while((n==6)&&(t>fitimeccc[j+2])&&(t<=fitimeccc[j+3]))
    {
        m=j+2;
        if((((Ipmax>=65)&&(Ipmax<75)&&(Ireq>=65)&&(Ireq<75))||((Ipmax>=75)&&(Ipmax
<85)&&(Ireq>=75)&&(Ireq<85))||((Ipmax>=85)&&(Ipmax<95)&&(Ireq>=85)&&(Ireq<95))||
((Ipmax>=95)&&(Ipmax<105)&&(Ireq>=95)&&(Ireq<105))||((Ipmax>=105)&&(Ipmax<115)&&
(Ireq>=105)&&(Ireq<115)))&&(Vpmax>=112.5)) //50th rule of fuzzy algorithm
        {
            Gbatt=50-Nbatt;
            Vpmax=10*Vstrfull;
            printf("Batt group %d have %d batts in series charge start at time %.2fh\n",n,Gbatt,t);
            printf("Which I,V,P for supply batt and motor = %.2fA,%.2fV,%.0fW
respectively\n",Ipmax,Vpmax,Ipmax*Vpmax);
            Nbatt=Nbatt+Gbatt;

```

```

        fitimeccc[n]=t+CCC;
        n=n+1;
    }
    t=t+T;
    simfuz2();
    simfuz3();
}
//Batt 6th group charge start between on CVC of batt 1st,2nd,3rd and 4th group and CCC of batt 5th
group
while((n==6)&&(t>fitimeccc[j+3])&&(t<=fitimeccc[j+4]))
{
    m=j+3;
    if((((Ipmax>=45)&&(Ipmax<55)&&(Ireq>=45)&&(Ireq<55))||((Ipmax>=55)&&(Ipmax
<65)&&(Ireq>=55)&&(Ireq<65))||((Ipmax>=65)&&(Ipmax<75)&&(Ireq>=65)&&(Ireq<75))||
((Ipmax>=75)&&(Ipmax<85)&&(Ireq>=75)&&(Ireq<85))||((Ipmax>=85)&&(Ipmax<95)&&
(Ireq>=85)&&(Ireq<95))||((Ipmax>=95)&&(Ipmax<105)&&(Ireq>=95)&&(Ireq<105))||
((Ipmax>=105)&&(Ipmax<115)&&(Ireq>=105)&&(Ireq<115)))&&(Vpmax>=112.5)) //51th
rule of fuzzy algorithm
    {
        Gbatt=50-Nbatt;
        Vpmax=10*Vstrfull;
        printf("Batt group %d have %d batts in series charge start at time %.2fh\n",n,Gbatt,t);
        printf("Which I,V,P for supply batt and motor = %.2fA,%.2fV,%.0fW
respectively\n",Ipmax,Vpmax,Ipmax*Vpmax);
        Nbatt=Nbatt+Gbatt;
        fitimeccc[n]=t+CCC;
        n=n+1;
    }
    t=t+T;
    simfuz2();
    simfuz3();
}
//Batt 6th group charge start on CVC of batt 1st,2nd,3rd,4th and 5th group
while((n==6)&&(t>fitimeccc[j+4]))
{
    m=j+4;
    if((((Ipmax>=25)&&(Ipmax<35)&&(Ireq>=25)&&(Ireq<35))||((Ipmax>=35)&&(Ipmax
<45)&&(Ireq>=35)&&(Ireq<45))||((Ipmax>=45)&&(Ipmax<55)&&(Ireq>=45)&&(Ireq<55))||
((Ipmax>=55)&&(Ipmax<65)&&(Ireq>=55)&&(Ireq<65))||((Ipmax>=65)&&(Ipmax<75)&&
(Ireq>=65)&&(Ireq<75))||((Ipmax>=75)&&(Ipmax<85)&&(Ireq>=75)&&(Ireq<85))||
((Ipmax>=85)&&(Ipmax<95)&&(Ireq>=85)&&(Ireq<95))||((Ipmax>=95)&&(Ipmax<105)&&
(Ireq>=95)&&(Ireq<105))||((Ipmax>=105)&&(Ipmax<115)&&(Ireq>=105)&&(Ireq<115)))&&
(Vpmax>=112.5)) //52th rule of fuzzy algorithm
    {
        Gbatt=50-Nbatt;
        Vpmax=10*Vstrfull;
        printf("Batt group %d have %d batts in series charge start at time %.2fh\n",n,Gbatt,t);
        printf("Which I,V,P for supply batt and motor = %.2fA,%.2fV,%.0fW
respectively\n",Ipmax,Vpmax,Ipmax*Vpmax);
        Nbatt=Nbatt+Gbatt;
        fitimeccc[n]=t+CCC;
        n=n+1;
    }
    t=t+T;
    simfuz2();
    simfuz3();
}
}

```

```

/*****/
//Compute time which batt each group charge full
//Compute time batt charge stop
while(n!=13)
{
  if((n==7)&&(t>fitimeccc[1]+4))
  {
    printf("Batt group 1 charge full at time %.2fh\n",t-T);
    n=n+1;
  }
  if((n==8)&&(t>fitimeccc[2]+4))
  {
    printf("Batt group 2 charge full at time %.2fh\n",t-T);
    i=1; //Index for batt charge full more than 10 batts
    n=n+1;
  }
  if((n==9)&&(t>fitimeccc[3]+4))
  {
    printf("Batt group 3 charge full at time %.2fh\n",t-T);
    n=n+1;
  }
  if((n==10)&&(t>fitimeccc[4]+4))
  {
    printf("Batt group 4 charge full at time %.2fh\n",t-T);
    n=n+1;
  }
  if((n==11)&&(t>fitimeccc[5]+4))
  {
    printf("Batt group 5 charge full at time %.2fh\n",t-T);
    n=n+1;
  }
  if((n==12)&&(t>fitimeccc[6]+4))
  {
    printf("Batt group 6 or all batts charge full at time %.2fh\n",t-T);
    n=n+1;
  }
  if((n<=11)&&(Vpmax<10*Vstrfull)) //Batt group 5 charge not complete, Usually have to
142.5 V but this point significance //53th rule of fuzzy algorithm
  {
    printf("Batt all group charge stop at time %.2fh\n",t);
    n=13;
  }
  if((n==12)&&(Vpmax<Vt)) //Batt group 5 charge complete, Usually have to 112.5 V but
this point significance //54th rule of fuzzy algorithm
  {
    printf("Batt all group charge stop at time %.2fh\n",t);
    n=13;
  }
  t=t+T;
  simfuz2();
}

/*****/
//Compute time for batt discharge energy to motor due to solar panel insufficient support
while((n==13)&&(i==1)) //Batt charge full more than 10 batts
{
  if(Ipmax<15)//55th rule of fuzzy algorithm
  {
    printf("Batt discharge energy to motor at time %.2fh\n",t);
    n=n+1;
  }
  t=t+T;
  simfuz2();
}
getch();
}

```



```

#####
//Model of solar insolation,PV array and MPPT
void simfuz2(void)
{   S=(940-(58*pow(t-4,2)))*(AREA/100); //Define for solar insolation
    Iph=(5*np/1000)*S; //Define for photocurrent
    Ipmax=0.95*Iph; //Define for current at maximum power
    Vpmax=(k*Temp*A*ns/q)*log(((0.06/Irs)*(Iph/np))+1); //Define for voltage at maximum power
}

#####
//Compute requirement current on CVC for charge batt and supply DC motor
void simfuz3(void)
{   if(m==j)
    {   Ireq=Ia+Istr*exp(-(t-fitimeccc[j]))+Istr*(n-m);}
    if(m==j+1)
    {   Ireq=Ia+Istr*exp(-(t-fitimeccc[j]))+Istr*exp(-(t-fitimeccc[j]-(fitimeccc[j+1]-fitimeccc
[j]))) +Istr*(n-m);}
    if(m==j+2)
    {   Ireq=Ia+Istr*exp(-(t-fitimeccc[j]))+Istr*exp(-(t-fitimeccc[j]-(fitimeccc[j+1]-fitimeccc
[j]))) +Istr*exp(-(t-fitimeccc[j]-(fitimeccc[j+2]-fitimeccc[j]))) +Istr*(n-m);}
    if(m==j+3)
    {   Ireq=Ia+Istr*exp(-(t-fitimeccc[j]))+Istr*exp(-(t-fitimeccc[j]-(fitimeccc[j+1]-fitimeccc
[j]))) +Istr*exp(-(t-fitimeccc[j]-(fitimeccc[j+2]-fitimeccc[j]))) +Istr*exp(-(t-fitimeccc[j]-(fitimeccc[j+3]-
fitimeccc[j]))) +Istr*(n-m);}
    if(m==j+4)
    {   Ireq=Ia+Istr*exp(-(t-fitimeccc[j]))+Istr*exp(-(t-fitimeccc[j]-(fitimeccc[j+1]-fitimeccc
[j]))) +Istr*exp(-(t-fitimeccc[j]-(fitimeccc[j+2]-fitimeccc[j]))) +Istr*exp(-(t-fitimeccc[j]-(fitimeccc[j+3]-
fitimeccc[j]))) +Istr*exp(-(t-fitimeccc[j]-(fitimeccc[j+4]-fitimeccc[j]))) +Istr*(n-m);}
}

//***** END PROGRAM *****/

```

ภาคผนวก ก.

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

1. "Optimization of Power Transfer in a Solar Energy System", Proc. The 8th Tri-University International Joint Seminar & Symposium 2001, pp. 196-199, October 30 – November 2, 2001.

2. "การจำลองผลระบบพลังงานแสงอาทิตย์", วารสารวิชาการเนคเทค, ปีที่ 3, ฉบับที่ 10, หน้า 49-56, มีนาคม – มิถุนายน 2544.

3. "การถ่ายโอนกำลังอย่างเหมาะสมที่สุดสำหรับระบบที่ใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์", วารสารเทคโนโลยีสุรนารี, ปีที่ 9, ฉบับที่ 1, หน้า 16-22, มกราคม – มีนาคม 2545.

4. "การออกแบบระบบพลังงานแสงอาทิตย์", วารสารโลกพลังงาน, ปีที่ 5, ฉบับที่ 15, หน้า 9-16, เมษายน - มิถุนายน 2545.

5. "การออกแบบและอนุวัตตัวควบคุมพีซซีเพื่อจัดการพลังงานในระบบพลังงานแสงอาทิตย์", การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาของประเทศไทย ครั้งที่ 3, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 18-19 กรกฎาคม 2545. (ตามหนังสือตอบรับที่ ทม 5145/ว.6 ลงวันที่ 26 มีนาคม 2545 จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี)

OPTIMIZATION OF POWER TRANSFER IN A SOLAR ENERGY SYSTEM

S. SUJITJORN
P. PAO-LA-OR

School of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology Nakhon Ratchasima,
Thailand 30000.

ABSTRACT This article presents an approach to maximize the transfer of power to all load elements in a solar energy system. Transfer of power from the solar panel to batteries and motor utilizes a maximum-power-point-tracker (MPPT) and a DC/DC converter. This converter operates on optimum transformation ratios. Losses of the motor are minimized such that the energy fed to the load is kept minimum.

1. INTRODUCTION

This article describes the optimization of power transfer in a solar energy system. The system consists of 200 modules of solar or PV panels and 50 packs of lead-acid batteries supplying a motor with a helical pump. This system has to withstand 24 hours of operation as, for instant, a blood supplying system for a clinic in rural area, water circulation system for a resort in remote places, etc. The batteries can be either source or load in the system, while solar panels are weather dependent source. Both sources exhibit highly nonlinear characteristics. The structure of the system is shown in fig.1. In order to maximally use the energy available from the PV panels, detailed consideration of the power transfer throughout the system must be conducted.

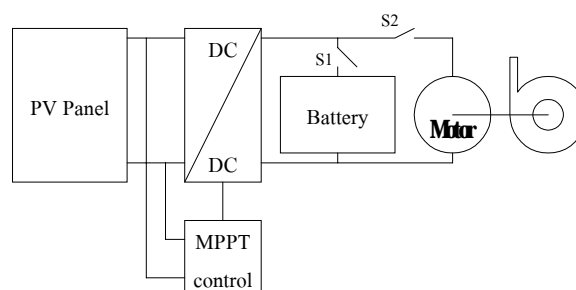


Fig. 1 Structure of a solar-energy system

It is always said that the solar energy is free. However, to convert it into a useful form of electricity is very expensive. Moreover, the electrical characteristics of the PV panels are highly nonlinear as described by [1-8]. These characteristics based on technical data from [8] are depicted in fig.2 and 3. The maximum power point tracker or MPPT control plays an important role to track maximum power available from the panels and lock them as instantaneous operating points. Those maximum power points are also shown in fig.2 and 3. The MPPT controller is usually implemented using microprocessor technology. Its description can be found in [5,8].

Our work described herein is concerned with how to maximally transfer the available power from the PV panel to feed the components on the right of the DC/DC converter (see fig.1). The converter acts as an agent to maximize the power transfer via its operation under optimum transformation ratios. These ratios are presented in the next section. Losses minimization for the motor coupled with pump is described in the paper.

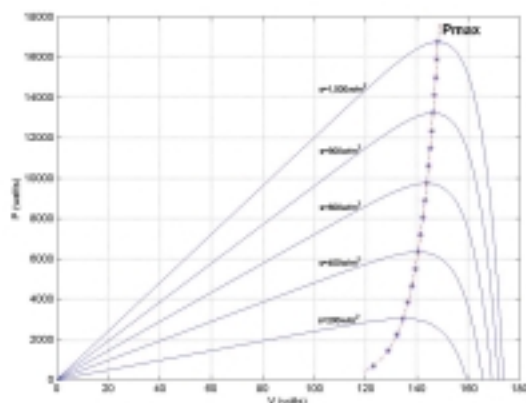


Fig. 2 Power vs voltage characteristics of PV panels (vary due to solar insolation)

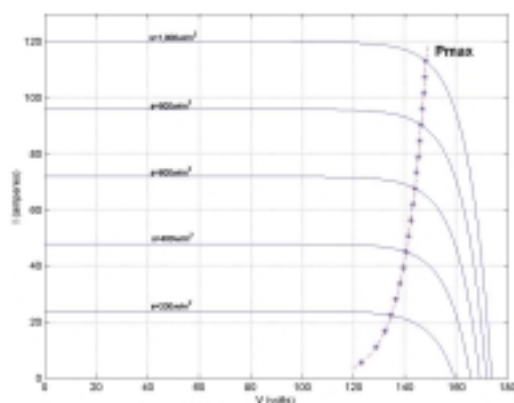


Fig. 3 Current vs voltage characteristics of PV panels (vary due to solar insolation)

2. DERIVATION OF THE TRANSFORMATION RATIO (D) FOR THE DC/DC CONVERTER

The DC/DC converter acts as a power transferring device to the rest of the components of the system. This converter operates according to precalculated transformation ratio (D). In terms of electronic implementation of the device, this ratio can be referred to as firing delay factor of the switching components. There are 3 modes of operation to consider, ie (1) the PV panels supply the motor with helical pump directly, (2) the PV panels supply the battery banks under charging scheme, and (3) the PV panels supply both battery banks and motor coupled with pump simultaneously. The derivation of the ratio D_s must take into account the nonlinear characteristics of the panels, motor, and batteries. To derive these ratios requires the knowledge of component's models. Due to the limited space, the readers should refer to [1-8] for the PV panel model, [9-12] for the battery model, and [13-16] for the motor model. The helical pump is considered a parabolic mechanical load [15]. The summary of these derived ratios is what follows.

2.1 PV panels supply motor with helical pump

Running the motor and pump at steady flow is of our interest. During this operation the motor voltage can be expressed by

$$V_t = R_a I_a + k_b \left[\frac{-B/k + \sqrt{(B/k)^2 + (4k_b I_a/k)}}{2} \right] \quad (1)$$

where V_t is the motor armature voltage (V)

I_a is the armature current (A)

R_a is the armature resistance (Ω)

k_b is the motor constant (V/rad/sec)

B is the viscous friction of the motor (N.m/rad/sec), and

k is the pump constant (N-m/(rad/sec)²).

Providing the MPPT tracks the maximum power available from the PV panels (P_{max}), to maintain this power to drive the motor one can state that

$$D_m = \frac{V_t}{V_{Pmax}} = \frac{I_{Pmax}}{I_a} \quad (2)$$

From the Eq. (1) and (2), case (1) transformation ratio can be expressed by

$$D_m - \frac{k_b}{V_{Pmax}} \left(\frac{-B}{2k} + \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{B}{k}\right)^2 + \left(\frac{4k_b I_{Pmax}}{D_m k}\right)} \right) - \frac{I_{Pmax} R_a}{D_m V_{Pmax}} = 0 \quad (3)$$

Conventional numerical technique can be used to solved the Eq. (3) for the solutions of the ratio.

2.2 PV panels supply battery banks

Charging the batteries during the day can be achieved by using solar energy available. In this case, batteries are the PV panel's load. Even though batteries are nonlinear components, during charge time their terminal characteristics can be approximated by

$$V_b = V_0 + (R_{tot} \cdot I_b) \quad (4)$$

where V_b is the battery terminal voltage (V)

V_0 is the battery initial voltage for each charging rate (V)

R_{tot} is the equivalent internal resistance of the battery packs (Ω), and

I_b is the charging current (A).

In a similar manner to case (1), one can obtain the transformation ratio for case (2) as the following

$$D_b = \frac{1}{2} \left[\frac{V_0}{V_{Pmax}} + \sqrt{\left(\left(\frac{V_0}{V_{Pmax}} \right)^2 + \frac{4I_{Pmax} R_{tot}}{V_{Pmax}} \right)} \right] \quad (5)$$

Again, to obtain numerical solutions for the ratio requires some computing based on conventional numerical procedures.

2.3 PV panels supply both batteries and motor coupled with pump

More complication is added to the problem of transformation ratio derivation when the PV panels have to supply both batteries and motor. Regarding to this, the currents are drawn from the panels to drive the motor and charge the batteries as can be seen from the Eq. (6) for the formulation of transformation ratio.

$$D_h = \frac{V_t}{V_{Pmax}} = \frac{V_b}{V_{Pmax}} = \frac{I_{Pmax}}{I_a + I_b} \quad (6)$$

In a similar manner to the above two cases, one can derive the Eq. (7) for the transformation ratio of this case. The numerical results are plotted against various levels of solar insolation as shown in fig.4. When insolation is below 150 w/m², one have to adopt the transformation ratios obtained for either case (1) or case (2) corresponding to real situation.

$$\frac{k_b}{2} \sqrt{\left(\frac{B}{k}\right)^2 + 4k_b \left(\frac{I_{Pmax} R_{tot} - D_h^2 V_{Pmax} + D_h V_0}{D_h k R_{tot}} \right)} + R_a \left(\frac{I_{Pmax} R_{tot} - D_h^2 V_{Pmax} + D_h V_0}{D_h R_{tot}} \right) - D_h V_{Pmax} \frac{k_b B}{2k} = 0 \quad (7)$$

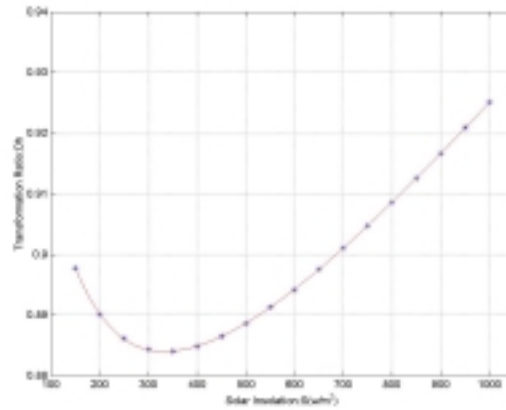


Fig. 4 Case (3) transformation ratio vs solar insolation

In terms of implementation, a microcontroller is required to choose the corresponding mode of operation based on current solar insolation. The ratio D_s should be computed off-line.

3. LOSSES MINIMIZATION IN MOTOR

Since the current from the PV panels is expensive, driving the motor must be safely conducted. One effective strategy is to minimize possible losses in the motor. In practice, this motor coupled with a helical pump is driven at constant field, constant motor current and voltage to meet the flow-rate requirement. The discussion of technology to implement this is omitted in the paper. It is of interest here to investigate how to drive the motor at minimum losses to save available power generated by the PV panels. Hence, the electrical power can be equated by

$$P_{in} = V_t I_a = P_{out} + P_{\Sigma} \quad (8)$$

where P_{Σ} stands for motor losses. The composition of the losses is armature losses, field winding losses, core losses, brush losses, friction and windage losses, and stray losses. Details for these loss terms can be found in [16-18]. The previous work [4] omitted the core-loss terms, while [15] employed field control. The work [17] utilizes filtering concepts. In our work, the minimum principle ($dP_{in}/dI_a = 0$) is applied to derive an expression for motor current that guarantees minimum losses under fixed filed operation. Based on P_{in} of the Eq. (8), one can obtain the Eq. (9)

$$3k \left(\frac{V_t - I_a^* R_a}{k_b} \right)^2 \left(\frac{-R_a}{k_b} \right) + 2I_a^* R_a + 2 + 2 \left(\frac{fw V_t I_a^*}{\omega_n^2} \right) \left(\frac{V_t - I_a^* R_a}{k_b} \right) \left(\frac{-R_a}{k_b} \right) + \left(\frac{fw V_t}{\omega_n^2} \right) \left(\frac{V_t - I_a^* R_a}{k_b} \right)^2 = 0 \quad (9)$$

where I_a^* is the feeding current (A) to the motor under minimized losses condition
 f_w is the coefficient of the friction and windage, and
 ω_n is nominal speed of motor (rad/sec).

According to our motor characteristics, the current is 12.50 A compared to 13.25 A of the conventional drive (without losses minimization).

4. CONCLUSIONS

This research contributes mainly to the design and development of an energy-saving controller of supervisory type. Due to the limited space, the design, implementation, and test results of this controller cannot be presented herein. Briefly, this controller has been implemented on a single-board with C codes to operate in real-time. This paper presents analytical details to obtain realizable functions embedded in such a controller. These consist of optimum transformation ratios and the motor current level to attain minimum motor losses.

5. ACKNOWLEDGMENT

Research support from Suranaree University of Technology is greatly acknowledged.

6. REFERENCES

- [1] Z. Zinger and A. Braunstein, Optimum operation of a combined system of a solar cell array and a dc motor, *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, vol. 100, no. 3, 1981, pp. 1193-1197.
- [2] J. Appelbaum, Starting and steady-state characteristics of dc motors powered by solar cell generators, *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 1, no. 1, 1986, pp. 17-25.
- [3] J. Appelbaum, The quality of load matching in a direct-coupling photovoltaic system, *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 2, no. 4, 1988, pp. 534-541.
- [4] S. M. Alghuwainem, Steady-state performance of dc motors supplied from photovoltaic generators with step-up converter, *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 7, no. 2, 1992, pp. 267-272.
- [5] K. H. Hussein, I. Muta, T. Hoshino and M. Osakada, Maximum photovoltaic power tracking: an algorithm for rapidly changing atmospheric condition, *IEE Proc.-Gen. Trans. Dist.*, vol. 142, no. 1, 1995, pp. 59-64.
- [6] V. Quaschnig and R. Hanitsch, Numerical simulation of current-voltage characteristics of photovoltaic systems with shaded solar cells, *Solar Energy*, vol. 56, no. 6, 1996, pp. 513-520.
- [7] K. Khouzam and K. Hoffman, Real-time simulation of photovoltaic modules, *Solar Energy*, vol. 56, no. 6, 1996, pp. 521-526.
- [8] C.-T. Pan, J.-Y. Chen, C.-P. Chu and Y.-S. Huang, A fast maximum power point tracker for photovoltaic power system, *Proc. IEEE 25th Ann. Conf. (IECON' 99)*, vol. 1, 1999, pp. 390-393.
- [9] J. F. Manwell and J. G. McGowan, Lead Acid Battery Storage Model for Hybrid Energy Source, *Solar Energy*, vol. 50, no. 5, 1993, pp. 399-405.
- [10] Z. M. Salameh, M. A. Casacca and W. A. Lynch, A Mathematical Model for Lead-Acid Batteries, *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 7, no. 1, 1992, pp. 93-97.
- [11] R. Rynkiewicz, Discharge and Charge Modeling of Lead Acid Batteries, *Proc. IEEE Conf. Applied Power Electronics*, vol. 2, 1999, pp. 707-710.
- [12] C. Protopopoulou, R. H. Marshall and B. J. Brinkworth, Battery State of Voltage Modelling and an Algorithm Describing Dynamic Conditions for Long-Term Storage Simulation in a Renewable System, *Solar Energy*, vol. 53, no. 6, 1994, pp. 517-527.
- [13] V. P. Ramamurthi and V. Subrahmanyam, Performance of a Separately Excited DC Motor Fed From a Multiphase Chopper, *Proc. IEEE Int. Conf. On Energy, Computer, Communication and Control Systems (TENCON'91)*, vol. 1, 1991, pp. 238-241.
- [14] C. D. Sousa and K. Bose, A Fuzzy Set Theory Based Control of a Phase-Controlled Converter DC Machine Drive, *IEEE Trans. Industry Application*, vol. 30, no. 1, 1994, pp. 34-44.
- [15] Y. Yao and R. S. Ramshaw, Optimized DC Motor Output in a Photovoltaic System, *Can. J. Elect. & Comp. Eng.*, vol. 20, no. 2, 1995, pp. 79-84.
- [16] S. J. Chapman, *Electric Machinery Fundamentals*, McGraw-Hill, 1991.

- [17] N. Margaris, T.Goutas, Z.Doulgeri, and A.Paschali, Loss Minimization in DC Drives, *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol.38, no.5, 1991, pp.328-336.
- [18] M.Hippner, H.Yamada and I.T. Miauno, Iron Loss Analysis in Linear DC Motor, *IEEE Trans. on Magnetics*, vol.35, no.5, 1999, pp.3715-3717.



Sarawut Sujitjorn was born in 1961, Bangkok. He received his BSc (EE) and PhD (EE) from the RTAF Academy and the University of Birmingham (UK) in 1984 and 1987, respectively. He is currently an associate professor and head of Electrical Engineering School, Suranaree University of Technology. His main research interests are on linear/nonlinear control, intelligent control, mechatronics, and identification.

He wishes Asia to save all sorts of energy as much as possible, and attempt more uses on alternative forms of energy including solar.



Padej Pao-la-or was born in 1976, Nakhon Ratchasima, Thailand. He received his BEng (EE) from Suranaree University of Technology in 1997. He is currently a research assistant and pursues his master's degree in electrical engineering at Suranaree University of Technology. His main research interest is on energy management.

He wishes that Asia will be successful in technological development and deployment of alternative and renewal energy.

การจำลองผลระบบพลังงานแสงอาทิตย์ Simulation of a Solar Energy System

เผด็จ เผ่าละออ¹, สรวุฒิ สุจิตจร²

¹ผู้ช่วยวิจัย, ²รองศาสตราจารย์

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ABSTRACT – This article reports our developed simulation program for a solar energy system. The mathematical models of various components are described. These include solar cells, batteries, motor, and helical pump. The motor and pump is a coupled load. Solar cells are weather dependent sources. Batteries act in two modes of either sources or loads. Due to the component's nonlinearity and insolation characteristic, the simulation program is necessary and useful for energy studies in such a system.

KEY WORDS – solar energy, photovoltaic, simulation

บทคัดย่อ – บทความนี้นำเสนอการจำลองผลระบบพลังงานแสงอาทิตย์ พร้อมรายละเอียดแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของส่วนประกอบต่างๆ ได้แก่ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ต่อคู่ควบกับแบตเตอรี่ทำหน้าที่เป็นแหล่งพลังงานจ่ายให้มอเตอร์และปั๊มพหุขงที่เป็นโหลดของระบบ แบตเตอรี่บางขณะเป็นแหล่งพลังงานบางขณะเป็นโหลด แผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานที่ขึ้นกับสภาพอากาศ เนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นของส่วนประกอบต่างๆ รวมจนถึงความเข้มแสงอาทิตย์ การมีโปรแกรมจำลองผลจึงจำเป็นและจะมีประโยชน์ต่อการศึกษาด้านพลังงานในระบบเซลล์แสงอาทิตย์

คำสำคัญ – พลังงานแสงอาทิตย์, โฟโตโวลตาอิก, การจำลองผล

1. บทนำ

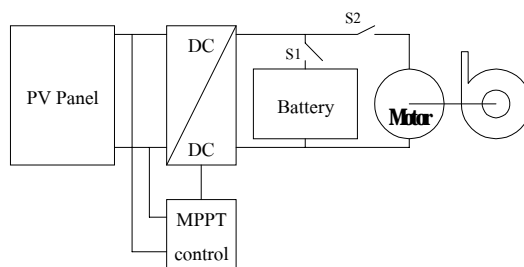
ประเทศไทยอยู่ในภูมิภาคที่ได้รับแสงอาทิตย์ค่อนข้างคงที่ตลอดทั้งปี นับว่าอย่างยิ่งที่จะนำพลังงานจากแสงอาทิตย์ซึ่งเป็นพลังงานสะอาดมาใช้ประโยชน์ การแปลงพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นไฟฟ้า อาศัยเซลล์แสงอาทิตย์ที่อยู่ในรูปของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งมีลักษณะการใช้งานไม่ยุ่งยาก เพราะให้เอาต์พุตที่ไม่เป็นเชิงเส้น ผันแปรไปตามโหลด ปริมาณแสงที่กระทบและอุณหภูมิในสภาพแวดล้อม นอกจากนั้น ยังมีประสิทธิภาพต่ำและราคาแพง แต่เนื่องจากในปัจจุบันแผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นเพียงทางเลือกเดียว สำหรับการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์ไปเป็นพลังงานไฟฟ้าเพื่อใช้ประโยชน์ การใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์จึงต้องให้ได้คุ้มค่าต่อการลงทุน

งานวิจัยที่นำเสนอในบทความนี้ สนใจระบบพลังงานแสงอาทิตย์ที่สามารถปฏิบัติงานในพื้นที่ทุรกันดารที่จำเป็น เช่น สถานพยาบาล สถานีอนามัย ที่อาจมีเหตุการณ์ฉุกเฉินหรือแม้กระทั่งแหล่งท่องเที่ยวตามอุทยานต่างๆ การที่จะบรรลุวัตถุประสงค์ดังกล่าว จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการหาแหล่งพลังงานสำรองให้แก่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อพิจารณาถึงความต้องการระบบดังกล่าวสำหรับประเทศกำลังพัฒนา แหล่งพลังงานที่น่าเชื่อถือและราคาถูก คงเป็นแบตเตอรี่รถยนต์ ซึ่งก็จะต้องยอมรับในความยุ่งยากด้านการบำรุงรักษา และลักษณะสมบัติที่ไม่เป็นเชิงเส้นอย่างมากของแบตเตอรี่ การจะทำความเข้าใจให้ได้ตั้งแต่ถึงพลวัตของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นเช่นนี้ คงต้องอาศัยความรู้ด้านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการจำลองผล บท

ความจริงกล่าวถึงรายละเอียดแบบจำลองของอุปกรณ์ต่างๆ ที่ต่อควมกันดังรูปที่ 1 และอธิบายถึงโครงสร้างของ โปรแกรมจำลองผลตลอดจนแสดงผลที่ได้จากการใช้งาน โปรแกรม ซึ่งพัฒนาขึ้นด้วย MATLAB™

2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุปกรณ์ในระบบเซลล์แสงอาทิตย์

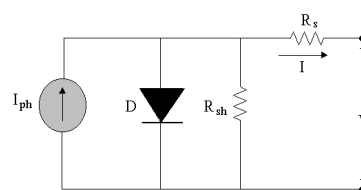
ระบบเซลล์แสงอาทิตย์มีองค์ประกอบดังรูปที่ 1 มอเตอร์ ขนาด 2.5 hp พร้อมปั๊มพหุขงเป็นโหลดที่ต้องใช้งาน ทั้งช่วงเวลากลางวันและช่วงเวลากลางคืน โดยสมมติให้ ใช้งานในช่วงเวลากลางวันที่มีแสงอาทิตย์ทั้งหมด 8 ชั่วโมง (08.00-16.00น.) และใช้งานในช่วงเวลากลางคืนที่ไม่มีแสงอีก 6 ชั่วโมง ซึ่งต้องอาศัยแหล่งจ่ายพลังงานจำนวนมาก เป็นแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดซึ่งใช้เป็นแหล่งพลังงานสำรองในช่วงเวลากลางคืนและกลางวันที่ไม่เปิด ในบางโอกาสแบตเตอรี่เหล่านี้ก็จะเป็ โหลดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ กล่าวคือในช่วงชาร์จ แผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานหลักที่ขึ้นอยู่กับสภาพอากาศ โดยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ต้องมีจำนวนเพียงพอที่จะผลิตพลังงานไฟฟ้า เพื่อนำไปชาร์จแบตเตอรี่พร้อมทั้งจ่ายให้แก่มอเตอร์ภายในช่วงระยะเวลาที่มีแสง 8 ชั่วโมง ส่วนช่วงระยะเวลาที่ไม่มีแสง ก็เป็นหน้าที่ของแบตเตอรี่ที่ต้องดิสชาร์จพลังงานไฟฟ้าให้แก่มอเตอร์ โดยแบตเตอรี่จะต้องมีจำนวนเพียงพอที่จะดิสชาร์จได้ตลอดช่วงระยะเวลาที่ไม่มีแสงทั้ง 6 ชั่วโมงนี้ด้วย จากการพิจารณาระบบเซลล์แสงอาทิตย์ในงานวิจัยนี้ จึงประกอบด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งหมด 96 โมดูล ต่อเป็นแผงขนานกัน 12 แผง ซึ่งแต่ละแผงมีเซลล์แสงอาทิตย์ 8 โมดูลต่ออนุกรมกันอยู่ และประกอบด้วยแบตเตอรี่จำนวนทั้งหมด 20 ลูก ต่อเป็นแผงขนานกัน 2 แผง ซึ่งแต่ละแผงมีแบตเตอรี่ 10 ลูกต่ออนุกรมกันอยู่ การใช้งานแผงเซลล์แสงอาทิตย์อย่างคุ้มค่าต้องพึ่งพาชุดควบคุมตามรอยกำลังงานสูงสุด (MPPT control) และ ดิซี/ดิซีคอนเวอร์เตอร์ เพื่อให้กำลังไฟฟ้าออกมาสูงสุด องค์ประกอบต่างๆ ของระบบมีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังที่จะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 1. ระบบเซลล์แสงอาทิตย์

2.1 แบบจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์

แผงเซลล์แสงอาทิตย์หมายถึง อุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์จำนวนมาก ที่ได้รับการสร้างประกอบขึ้นเป็นแผง วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ [1] แสดงได้ดังรูปที่ 2 ปกติความต้านทานขนานรอยต่อ p-n (R_{sh}) มีขนาดใหญ่มาก และความต้านทานในเนื้อสารกึ่งตัวนำและจุดเชื่อมต่อ (R_s) มีค่าน้อยมาก แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แสดงความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จึงเขียนแสดงได้ดังนี้



รูปที่ 2. วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์

$$I = n_p I_{ph} - n_p I_{rs} \left[\exp\left(\frac{qV}{kTAn_s}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

ซึ่ง I_{ph} คือ กระแสโฟโต (A)

I_{rs} คือ กระแสอิ่มตัวย้อนกลับ (A)

n_p คือ จำนวน โมดูลที่ต่อขนานกัน

n_s คือ จำนวนเซลล์ที่ต่ออนุกรมกัน

q คือ ค่าประจุอิเล็กตรอน (1.6×10^{-19} C)

k คือ ค่าคงที่โบลทซ์มันน์ (1.38×10^{-23} J/K)

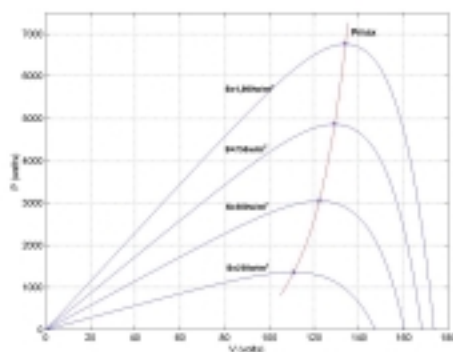
A คือ ค่าคงที่ตัวประกอบของรอยต่อ p-n

T คือ อุณหภูมิของเซลล์ (K)

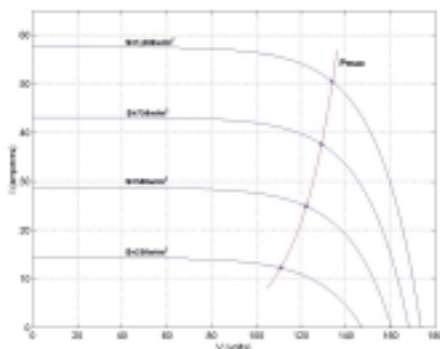
ข้อมูลในการจำลองผล ใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ของซีเมนส์ SP-75W [2] โมดูลหนึ่งประกอบด้วยเซลล์ทั้งหมด 36 เซลล์ต่ออนุกรมกัน มีค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้

- ความเข้มแสง 1000 W/m² (peak power)
- อุณหภูมิ 38^oC (311 K)
- A=2.46 (มีค่าอยู่ระหว่าง 1-5) [1]
- กำลังไฟฟ้าพิกัด 75 W; กระแสพิกัด 4.4 A
- แรงดันพิกัด 14-17 V; I_{ph}=4.8 A
- แรงดันขณะเปิดวงจร 21.7 V; R_s≈0 Ω

กรณีแผงเซลล์แสงอาทิตย์ SP-75W นี้ ค่า n_s=36 ขณะที่ n_p=1 จากสมการที่ (1) เมื่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไม่มีโหลดคำนวณได้ว่า I_{sc}=5.1768E-4 A โดยสมมติให้อุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์คงที่ตลอด ในการใช้งานให้บรรลุตามสมมติฐานที่ตั้งไว้ จะต้องใช้เซลล์แสงอาทิตย์ทั้งหมด 96 โมดูล โดยแบ่งเป็นจำนวนโมดูลที่อนุกรมในแต่ละแผงเท่ากับ 8 (n_s=8*36) และจำนวนโมดูลที่ต่อขนานกันของเซลล์แสงอาทิตย์เท่ากับ 12 (n_p=12)



รูปที่ 3. ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 4. ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแสไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

รูปที่ 3 และ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้า แรงดัน และกระแสที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ผันแปรไปตามความเข้มแสงอาทิตย์ การใช้งานแผงเซลล์แสงอาทิตย์อย่างคุ้มค่า อาศัยกลไกการตามรอยกำลังงานสูงสุดหรือ MPPT โดยหลักการแล้วอุปกรณ์ MPPT จะจัดการให้กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ที่ระดับสูงสุดสอดคล้องกับความเข้มแสงอาทิตย์ (S) ในขณะนั้น ในทางปฏิบัติตัวควบคุม MPPT ทำงานควบคู่ไปกับ ดีซี/ดีซี คอนเวอร์เตอร์ ซึ่งจะต้องทำงานด้วยอัตราส่วนการแปลง D (transformation ratio) ที่เหมาะสมกับสภาวะการทำงานของแหล่งพลังงานและโหลด

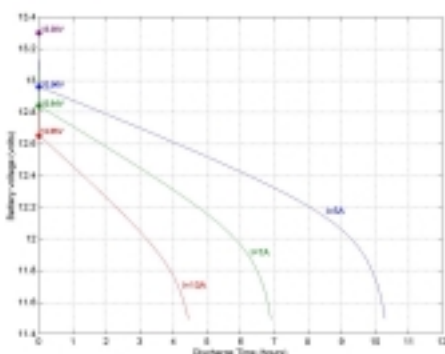
2.2 แบบจำลองแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด

แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดแม้ว่าจะมีราคาถูก หาได้ง่ายในประเทศ แต่ก็มีลักษณะสมบัติการทำงานที่ไม่เป็นเชิงเส้นอย่างมากทั้งในขณะชาร์จและดิสชาร์จ สมการที่ (2) อธิบายกระบวนการชาร์จและดิสชาร์จ [3] รูปสมการที่ปรากฏขณะนี้ใช้สำหรับช่วงการดิสชาร์จ สำหรับช่วงชาร์จเครื่องหมายลบทางขวาของสมการที่ (2) จะเปลี่ยนเป็นบวกทั้งหมด

$$V_b = V_0 - (R_{tot} \cdot I) - \left[K1 \cdot \frac{I^n}{C} \right] \cdot t - \left[\frac{K2}{C - I^n \cdot t} \right] \quad (2)$$

- ซึ่ง V_b คือ แรงดันที่ขั้วของแบตเตอรี่ (V)
- V₀ คือ แรงดันเริ่มต้นของแบตเตอรี่ (V)
- R_{tot} คือ ความต้านทานภายในรวม (Ω)
- I คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลในแบตเตอรี่ (A)
- C คือ ค่าความจุของแบตเตอรี่ (Ah)
- t คือ เวลาที่ใช้ในการดิสชาร์จ (ชาร์จ) แบตเตอรี่ (h)
- n คือ Peukert's exponent
- K1 คือ ค่าสัมประสิทธิ์จาก Peukert's equation
- K2 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ทำให้แรงดันตก (เพิ่ม) กระทั่งถึงเมื่อแบตเตอรี่ดิสชาร์จ (ชาร์จ) ใกล้เคียงหมด (เต็ม)

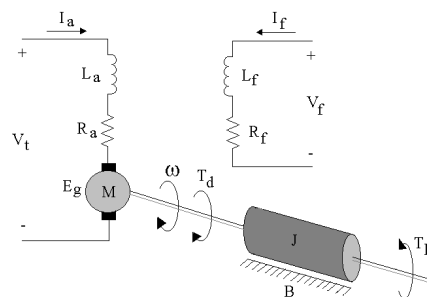
จากสมการที่ (2) จะพิจารณาเฉพาะช่วงสภาวะคงตัวเท่านั้น ซึ่งสภาวะชั่วคราวเกิดขึ้นได้ในจังหวะที่แบตเตอรี่เปลี่ยนการทำงานจากสภาวะชาร์จเป็นดิสชาร์จ และกลับไปตามด้วยช่วงเวลาสั้นมากคิดเป็นเพียงมิลลิวินาที จึงไม่คำนึงถึงในที่นี้ ดังนั้น จึงพิจารณาวัฏจักรการทำงานของแบตเตอรี่เป็น 3 ช่วง [4] กล่าวคือ ช่วงชาร์จด้วยกระแสคงที่หรือ CCC (constant current charge) ช่วงชาร์จด้วยแรงดันคงที่หรือ CVC (constant voltage charge) และช่วงดิสชาร์จด้วยกระแสคงที่หรือ CCD (constant current discharge) ข้อมูลในการจำลองผล ใช้แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดของ CELTIC [5] แรงดันปกติ 12 V ค่าความจุที่กัด 70 Ah ค่า R_{tot} ขณะดิสชาร์จและชาร์จเท่ากับ $6.15 \cdot 10^{-2} \Omega$ และ $6.56 \cdot 10^{-2} \Omega$ ตามลำดับ ค่า K1 และ K2 ขณะดิสชาร์จและชาร์จมีค่าเท่ากันเท่ากับ 0.90 และ 2.2 ตามลำดับ และค่า n ขณะดิสชาร์จและชาร์จเท่ากับ 1.16 และ 1.00 ตามลำดับ ส่วนค่าช่วงแรงดันขณะดิสชาร์จมีค่าแรงดันสูงสุด 13.3 V และแรงดันต่ำสุด 11.5 V และค่าช่วงแรงดันขณะชาร์จมีค่าแรงดันต่ำสุด 11.8 V และแรงดันสูงสุด 14.1 V นำค่าข้อมูลขณะดิสชาร์จแทนค่าในสมการที่ (2) ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ของแรงดันแบตเตอรี่ขณะดิสชาร์จเทียบกับเวลาเมื่อพิจารณาอัตราการดิสชาร์จคงที่ที่ 5, 7 และ 10 A ตามลำดับ แสดงได้ดังรูปที่ 5 ซึ่งอาจสังเกตเห็นว่า ขณะเริ่มดิสชาร์จแรงดันที่ขั้วของแบตเตอรี่จะตกลงอย่างรวดเร็วจากแรงดันสูงสุด ซึ่งมีสาเหตุจากค่าความต้านทานภายในรวมของแบตเตอรี่ จากนั้นแรงดันจะตกลงอย่างราบเรียบแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล ซึ่งเกิดจากค่าความจุของแบตเตอรี่และค่าความต้านทานภายในรวม



รูปที่ 5. แรงดันที่ขั้วของแบตเตอรี่ขณะดิสชาร์จ

2.3 แบบจำลองมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและป้อน

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่พิจารณาในงานนี้เป็นแบบกระตุ้นฟลักซ์แยกส่วน โดยมีวงจรสมมูลดังรูปที่ 6 [6] เมื่อใช้งานมอเตอร์ด้วยการปรับแรงดันอาร์เมเจอร์โดยมีความเข้มสนามเต็มพิกัด สามารถอธิบายการทำงานของมอเตอร์ด้วยแบบจำลองดังสมการที่ (3)



รูปที่ 6. วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

$$\begin{bmatrix} \frac{dI_a}{dt} \\ \frac{d\omega}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_a & -k_b \\ L_a & L_a \\ k_t & -B \\ J & J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \\ L_a & J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_t \\ T_L \end{bmatrix} \quad (3)$$

เมื่อ V_t คือ แรงดันที่ป้อนให้มอเตอร์ทางด้านอาร์เมเจอร์

I_a คือ กระแสอาร์เมเจอร์ (A)

L_a คือ ความเหนี่ยวนำทางด้านอาร์เมเจอร์ (H)

R_a คือ ความต้านทานอาร์เมเจอร์ (Ω)

ω คือ ความเร็วเชิงมุม (rad/sec)

J คือ โมเมนต์แรงเฉื่อยของมอเตอร์ (Kg.m^2)

B คือ วิตคอสฟริกชันของมอเตอร์

(N.m/rad/sec)

E_g คือ แรงดันย้อนกลับ: $k_b \omega$ (V)

T_L คือ แรงบิดของโหลด (N.m)

ข้อมูลในการจำลองผลของมอเตอร์ [7] มีดังนี้

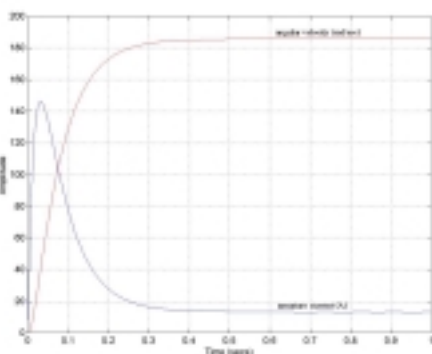
- ขนาดพิกัด 110 V, 20 A, 2.5 hp , 1800 rpm , 9.89 N-m

- $R_a = 0.6 \Omega$, $L_a = 8 \text{ mH}$

- $J = 0.0465 \text{ kg.m}^2$, $B = 0.004 \text{ N.m.sec/rad}$

- k_t (N-m/A) = k_b (V/rad/sec) = 0.55 N-m/A

โพลด์ที่มอเตอร์ขับเคลื่อนที่นี้คือปั๊มพหุโขง (helical pump) ซึ่งมีแรงบิดขึ้นอยู่กับความเร็วของมอเตอร์ กล่าวคือ $T_L = k\omega^2$ ซึ่ง k คือค่าคงที่ของปั๊ม มีค่าเท่ากับ 1.898×10^{-4} N-m/(rad/sec)² [8] เมื่อนำข้อมูลในการจำลองผลของปั๊มและมอเตอร์แทนค่าในสมการที่ (3) เพื่อหาความสัมพันธ์ของค่า I_a และ ω เทียบกับเวลา โดยป้อนแรงดันที่ค่าพิกัด $V_t = 110$ V ซึ่งกำหนดให้ที่เวลาเป็นศูนย์ ค่า I_a และ ω มีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 7

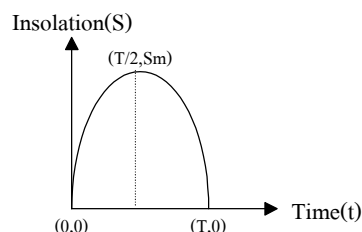


รูปที่ 7. ความสัมพันธ์ของกระแสอาร์เมเจอร์และความเร็วเทียบกับเวลา

จากรูปที่ 7 จะสังเกตเห็นว่ากระแสอาร์เมเจอร์เพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในขณะที่เริ่มเดินเครื่อง จากนั้นกระแสอาร์เมเจอร์จะลดลงอย่างรวดเร็วและเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ 13.25 A ส่วนความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ 185.56 rad/sec หากพิจารณาการมิโนมิซก่าลิ่งสูญเสียในมอเตอร์ กระแสอาร์เมเจอร์จะเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ 12.49 A เท่านั้น

2.4 แบบจำลองความเข้มแสงอาทิตย์

จากข้อมูลดาวเทียม GMS 4 และ GMS 5 ตั้งแต่เดือนมกราคม 2536 ถึงธันวาคม 2541 ค่าเฉลี่ยความเข้มแสงอาทิตย์ (insolation, S) ทั่วประเทศไทยจากทุกพื้นที่จะมีค่าเท่ากับ $18.2 \text{ MJ/m}^2/\text{day}$ [9] หรือโดยประมาณเท่ากับ $5 \text{ kw.hr/m}^2/\text{day}$ โดยงานวิจัย [10] ได้เสนอค่าความเข้มแสงอาทิตย์มีลักษณะเป็นรูปพาราโบลาระฆังคว่ำ ดังรูปที่ 8 ซึ่งเป็นค่าความเข้มแสงที่สอดคล้องกับความเป็นจริงในวันที่ฟ้าเปิด (sunny day) เมื่อ A คือพื้นที่ใต้กราฟของรูป และ p คือระยะจากจุดยอดไปตามแกนพาราโบล่า จะได้ว่า



รูปที่ 8. ลักษณะของรูปพาราโบลาระฆังคว่ำ

$$A = \int_0^T S dt = \int_0^T S_m dt - \frac{1}{4p} \int_0^T \left(t - \frac{T}{2}\right)^2 dt = S_m T - \frac{T^3}{48p} \quad (4)$$

จะได้ค่าความเข้มแสง S สัมพันธ์กับเวลา t ดังสมการที่ (5)

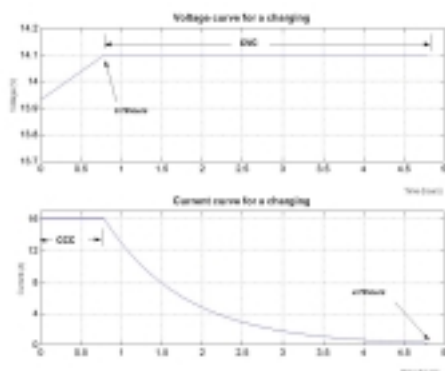
$$S = \frac{3}{2} \left(\frac{A}{T}\right) - \frac{6A}{T^3} \left(t - \frac{T}{2}\right)^2 \quad (5)$$

โดยพื้นที่ใต้กราฟ A เท่ากับ $5,000 \text{ w.hr/m}^2/\text{day}$ และใน 1 วัน จะกำหนดให้มีแสงอาทิตย์ทั้งหมด 8 ชั่วโมง (08.00-16.00 น.) ดังนั้น $T = 8 \text{ hr.}$ ซึ่งจากสมการที่ (5) จึงได้

$$S = 937.5 - 58.59(t - 4)^2 \quad (6)$$

3. การชาร์จแบตเตอรี่

แบตเตอรี่ทั้ง 20 ลูก ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์นี้ ต่อเป็นแผงขนานกัน 2 แผง ซึ่งแต่ละแผงมีแบตเตอรี่ 10 ลูก ต่ออนุกรมกันอยู่ การชาร์จแบตเตอรี่แต่ละแผง อาจแบ่งออกเป็น 2 ช่วง ได้แก่ CCC และ CVC ดังรูปที่ 9 โดยช่วง CCC เป็นการชาร์จด้วยอัตรากระแสคงที่ 16 A นาน 0.79 ชั่วโมง [11] ในช่วงนี้ค่าแรงดันแบตเตอรี่จะเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วจนกระทั่งถึงค่าแรงดันสูงสุด จากนั้นก็ดำเนินการชาร์จในช่วง CVC ต่อทันที ก่อนที่จะเกิดแรงดันเกินในแบตเตอรี่ ในช่วง CVC ต้องทำการลดปริมาณกระแสในการชาร์จแบตเตอรี่ลงแบบเอ็กซ์โปเนนเชียลจนเกือบเป็นศูนย์ เพื่อรักษาแรงดันในช่วง CVC ให้คงที่อยู่ที่ระดับสูงสุดประมาณ 4 ชั่วโมง จึงจะทำให้แบตเตอรี่ได้รับการชาร์จอย่างสมบูรณ์ [11] ในช่วงที่สองนี้ อัตราการชาร์จจึงอธิบายได้ด้วยฟังก์ชัน $16 \cdot \exp(-t)$ การชาร์จแบตเตอรี่แต่ละแผงจึงต้องการเวลา 4.79 ชั่วโมง แบตเตอรี่ทั้งสองแผงจะเริ่มชาร์จไม่พร้อมกัน โดยจะเริ่มชาร์จเป็นลำดับทีละแผงตามค่าความเข้มแสงที่พอเพียงต่อแบตเตอรี่แผงนั้นๆ



รูปที่ 9. ความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสของแบตเตอรี่ขณะชาร์จ

4. การจำลองผลระบบ

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุปกรณ์ต่างๆ ได้รับการบูรณาการขึ้นเป็นชุดโปรแกรมจำลองผล ที่มีโครงสร้างผังแผนภูมิในรูปที่ 10 ส่วนหนึ่งของโปรแกรมจำลองผลดำเนินการเกี่ยวกับโหมดการชาร์จแบตเตอรี่ ดำเนินการเริ่มที่ตำแหน่ง A ในแผนภูมิลงไปจนถึงสิ้นสุด

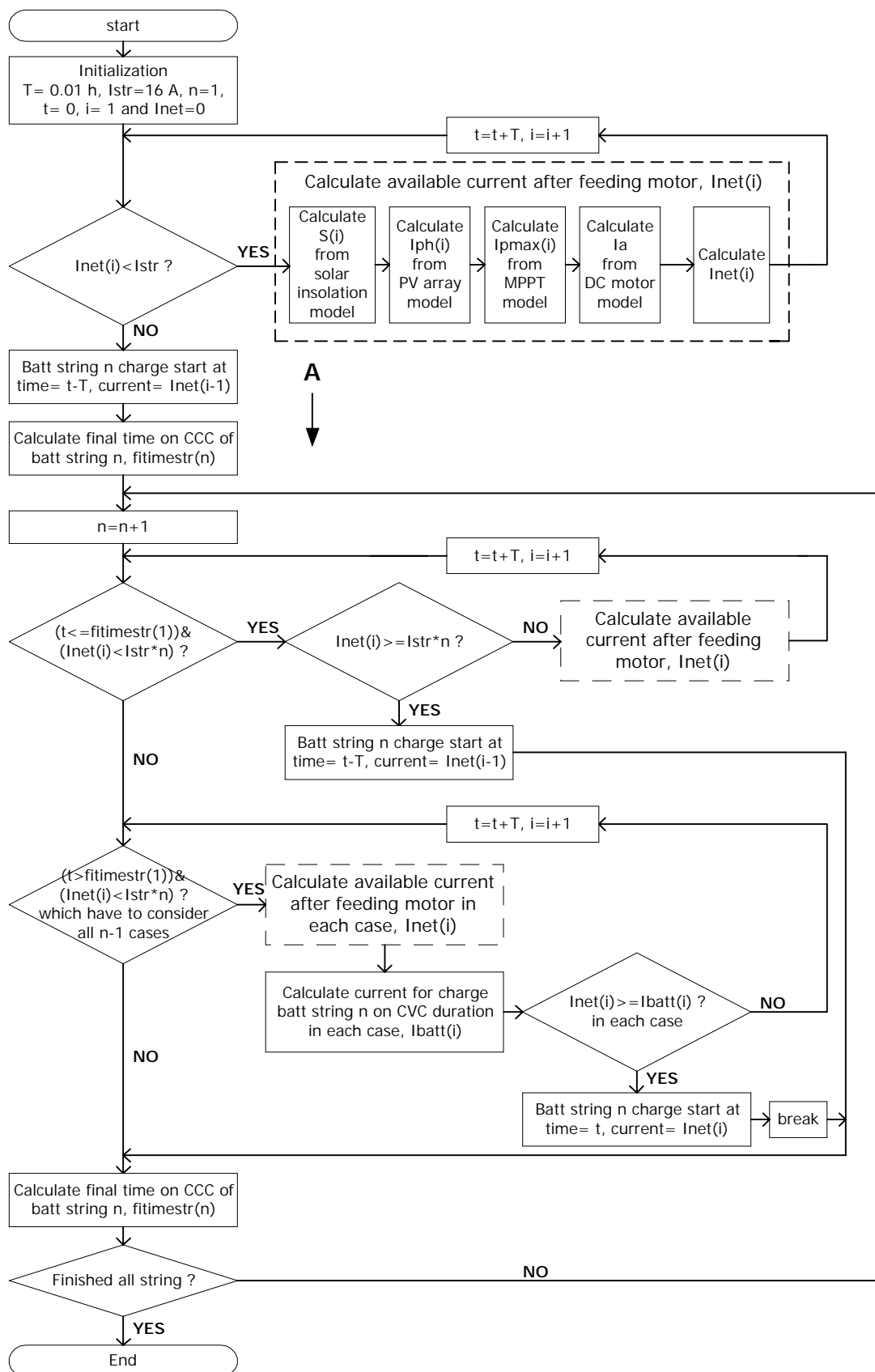
ตัวอย่างหนึ่งของการใช้โปรแกรมจำลองผลนี้ เพื่อศึกษาการใช้พลังงานในระบบแสดงดังรูปที่ 11 ซึ่งให้รายละเอียดการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เส้นโค้งรูปพาราโบลาเส้นบนแสดงปริมาณกระแสซึ่งให้กำลังงานสูงสุดที่จะได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ช่วง 8 ชั่วโมงในเวลากลางวัน (08.00-16.00น.) ของวันที่ฟ้าเปิด (ความเข้มแสงอาทิตย์ 5 kw.hr/m²/day) เป็นกรณีที่ดีที่สุดซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้จริงในประเทศไทยช่วงฤดูร้อนและฤดูหนาว เส้นโค้งรูปพาราโบลาเส้นล่างแสดงสิ่งเดียวกันในกรณีความเข้มแสงอาทิตย์เป็น 3/4 ของวันที่ฟ้าเปิดเพื่อเปรียบเทียบ เส้นประแสดงปริมาณกระแสที่จ่ายมอเตอร์ 12.49 A ขึ้นพื้นร่วมกับกระแสที่อาจดึงไปเพื่อชาร์จแบตเตอรี่ ผลดังที่แสดงให้ความหมายว่า การชาร์จแบตเตอรี่ทั้งสองแผงจะทำได้ภายในช่วงเวลากลางวันใน 1 วันนั้น ก็เฉพาะกรณีวันที่ฟ้าเปิดเท่านั้น หากเหตุการณ์ไม่เป็นดังนั้นอย่างเช่นความเข้มแสงอาทิตย์อ่อนลงเป็น 3/4 ของวันที่ฟ้าเปิด ก็จะไม่สามารถชาร์จแบตเตอรี่ให้เสร็จสิ้นได้ภายใน 1 วัน ในความเป็นจริงความเข้มแสงอาทิตย์ตลอดวันนั้นอาจไม่สม่ำเสมอ เราก็สามารถสร้างโครงรูปของกราฟความเข้ม

แสงใดๆ และป้อนเป็นข้อมูลให้โปรแกรมจำลองผลนำไปใช้งานได้ไม่ยาก

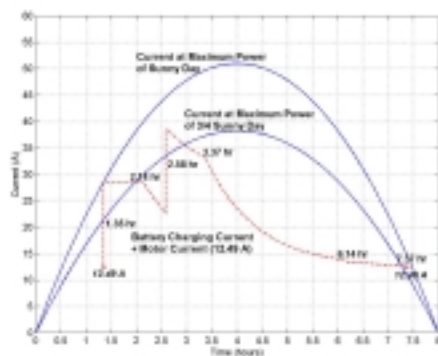
อีกตัวอย่างหนึ่งที่จะสะท้อนให้เห็นถึงความจำเป็นและประโยชน์ของการมีโปรแกรมจำลองผลก็ดังเช่น การวินิจฉัยว่าแบตเตอรี่จะทำงานได้นานกี่ชั่วโมง ในทางปฏิบัติที่คุ้นเคยกัน เราอาจคำนวณคร่าวๆ เช่น แบตเตอรี่ความจุ 70 Ah ดังที่ใช้ในงานวิจัยนี้ หากต้องจ่ายกระแส 12.49 A แก่มอเตอร์ จะทำงานได้ประมาณ 5.6 ชั่วโมง แต่หากพึ่งพาการคำนวณโดยใช้แบบจำลองที่แม่นยำดังที่ปรากฏในงานนี้ จะพิจารณาได้โดยละเอียดถึงลักษณะสมบัติจริงของแบตเตอรี่และของโหลด ดังที่แสดงในรูปที่ 12 เราพบว่าหากมีแบตเตอรี่แผงเดียว การป้อนไฟฟ้าแก่มอเตอร์โดยตรงทำได้เพียง 3.7 ชั่วโมงเท่านั้น หากใช้แบตเตอรี่ 2 แผง การขับมอเตอร์อาจทำได้ถึง 7.5 ชั่วโมง มิใช่ 11.2 ชั่วโมง

5. บทสรุป

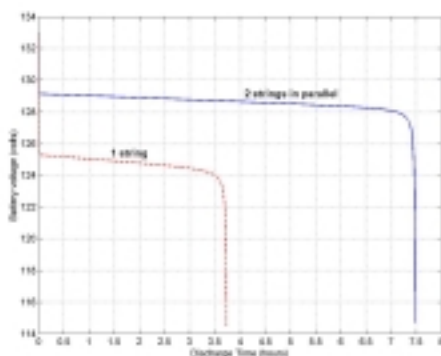
การใช้งานระบบเซลล์แสงอาทิตย์มีความซับซ้อน เนื่องจากลักษณะสมบัติอันไม่เป็นเชิงเส้นของแผงเซลล์แสงอาทิตย์และแบตเตอรี่ ประกอบกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีลักษณะสมบัติการทำงานที่ขึ้นกับสภาพอากาศ จำนวนแบตเตอรี่ที่ใช้สำรองพลังงานขึ้นกับความต้องการในการประกันการทำงานของระบบว่าจะให้ใช้งานได้เมื่อแดดอ่อนนานเป็นเวลาเท่าใด ความต้องการในการชาร์จแบตเตอรี่อย่างพอเพียง จึงทวีความซับซ้อนต่อการใช้งานระบบดังกล่าว การทำความเข้าใจพลวัตของระบบจึงยากเกินกว่าที่จะนึกหรือจินตนาการได้ เป็นเหตุให้ต้องพึ่งพาเทคนิคการจำลองผลระบบด้วยคอมพิวเตอร์ ซึ่งต้องใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุปกรณ์ต่างๆ ที่ประกอบขึ้นเป็นระบบ ดังที่บทความนี้ได้นำเสนอในรายละเอียดโปรแกรมการจำลองผลด้วย MATLABTM ที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปใช้ประโยชน์เพื่อการศึกษาการใช้พลังงานในระบบเซลล์แสงอาทิตย์ได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 10. แผนภูมิแสดงโครงสร้างของโปรแกรมจำลองผล



รูปที่ 11. ผลการจำลองระบบแสดงการดึงกระแสจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 12. การดิสชาร์จของแบตเตอรี่ 1 แผง และ 2 แผง

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย

เอกสารอ้างอิง

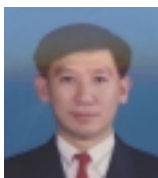
- [1] Hussein, K. H., Muta, I., Hoshino, T., and Osakada, M. (1995). Maximum photovoltaic power tracking : An algorithm for rapidly changing atmospheric condition. *IEE Proc-Gener. Transm. Distrib.* 142 (1): 59-64.
- [2] Pan, C., Chen, J., Chu, C., and Huang, Y. (1999). A fast power point tracker for photovoltaic power system. *Industrial Electronics Society, 1999. IECON'99 Proceedings.* 1: 390-393.
- [3] Rynkiewicz, R. (1999). Discharge and charge modeling of lead acid batteries, *Applied Power Electronics Conference and Exposition. IEEE.* 2: 707-710.
- [4] Salameh, Z.M., Casacca, M.A., and Lynch, W.A. (1992). A mathematical model for lead-acid batteries. *IEEE Transactions on Energy Conversion.* 7 (1): 93-97.
- [5] Protogeropoulos, C., Marshall, R. H., and Brinkworth, B. J. (1994). Battery state of voltage modelling and an algorithm describing dynamic conditions for long-term storage simulation in a renewable system. *Solar Energy.* 53 (6): 517-527.
- [6] Ramamurthi, V.P. and Subrahmanyam, V. (1991). Performance of a separately excited dc motor fed from a multiphase chopper. *TENCON'91. 1991 IEEE Region 10 International Conference on EC3-Energy, Computer, Communication and Control Systems.* 1: 238-241.
- [7] Sousa, C.D. and Bose, K. (1994). A fuzzy set theory based control of a phase-controlled converter dc machine drive. *IEEE Transactions on Industry Application.* 30 (1): 34-44.
- [8] Yao, Y. and Ramshaw, R.S. (1995). Optimized dc motor output in a photovoltaic system. *Can.J.Elect. & Comp.Eng.* 20 (2): 79-84.
- [9] มหาวิทยาลัยศิลปากร และ กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน. (ม.ป.ป.). แผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์จากข้อมูลดาวเทียมสำหรับประเทศไทย (Solar Radiation Map of Thailand) [ซีดี]. กรุงเทพฯ: กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงานร่วมกับมหาวิทยาลัยศิลปากร.
- [10] Harrington, S., Corporation, K., and Dunlop, J. (1992). Battery charge controller characteristics in photovoltaic systems. *IEEE AES MAGAZINE:* 15-21.

- [11] Casacca, M.A., Capobianco, M.R., and Salameh, Z.M. (1996). Lead acid battery storage configuration for improved available capacity. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 11(1): 139-145.



นายเผด็จ เผ่าละออ สำเร็จปริญญาตรี
ในสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อ
พ.ศ.2540 ภายหลังสำเร็จการศึกษาได้

เข้าทำงานในตำแหน่งผู้ช่วยสอนและวิจัย สาขาวิชา
วิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เป็นเวลา 1 ปี ปัจจุบัน
กำลังศึกษาระดับปริญญาโทและเป็นผู้ช่วยวิจัยที่
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีโดยได้รับทุนอุดหนุนวิจัย
ประจำปี 2543 ทางด้านการอนุรักษ์พลังงานจากทาง
มหาวิทยาลัย



นาวาอากาศโท สราวุฒิ สุจิตจร สำเร็จ
ปริญญาตรี และปริญญาเอกในสาขา
วิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จากโรงเรียนนาย
เรืออากาศ และมหาวิทยาลัยเบอร์มิง

แฮม ประเทศอังกฤษ เมื่อ พ.ศ.2527 และ 2530 ตามลำดับ
ปัจจุบันดำรงตำแหน่งรองศาสตราจารย์ และหัวหน้าสาขา
วิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ดำเนินงานวิจัยทางด้าน
ระบบควบคุมเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น การคำนวณกระบวนการ
ทางสัญญาณ การอนุรักษ์พลังงาน และการประยุกต์
เทคนิคทางปัญญาประดิษฐ์ อาจารย์สราวุฒิเป็นสมาชิก
วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยฯ สมาคมเทคโนโลยีที่
เหมาะสม และ IEEE อีกทั้งได้รับการจารึกชื่อไว้ใน
Who's Who in the World และ Who's Who in Science
and Engineering

การถ่ายโอนกำลังอย่างเหมาะสมที่สุดสำหรับระบบที่ใช้แผงเซลล์ แสงอาทิตย์

เผด็จ เผ่าละออ และ สราวุฒิ สุจิตจร

POWER TRANSFER OPTIMIZATION FOR A SOLAR PANEL SYSTEM

Abstract

This article presents research results in the optimization of power transfer in a solar energy system. Nonlinear characteristics of solar panels, batteries, and motor coupled with pump are taken into account. The transformation ratios for dc/dc converter are derived to achieve the maximum power transfer. Loss minimization for the motor is conducted to obtain the optimum driving current.

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลงานวิจัยด้านการออกแบบการถ่ายโอนกำลังงานในระบบพลังงานแสงอาทิตย์ การดำเนินงานจะต้องคำนึงถึงลักษณะสมบัติไม่เป็นเชิงเส้นของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ แบตเตอรี่ และมอเตอร์ต่อควมปั๊ม การพิจารณาแบ่งออกเป็นกรณีวิเคราะห์อัตราส่วนการแปลงพลังงานของดีซี/ดีซีคอนเวอร์เตอร์ เพื่อให้เกิดการถ่ายโอนกำลังงานได้สูงสุด และการวิเคราะห์อัตรากระแสขับมอเตอร์ในสภาวะที่จะเกิดการสูญเสียในมอเตอร์ต่ำที่สุด

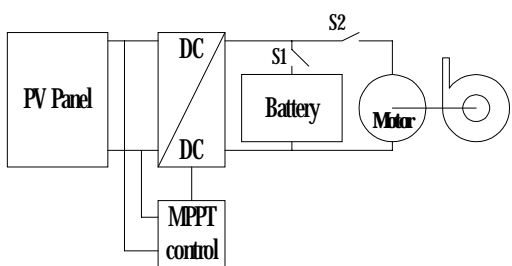
บทนำ

ปัจจุบัน ระบบพลังงานแสงอาทิตย์ กำลังได้รับความนิยมสนใจอย่างมากในด้านการอนุรักษ์พลังงาน เนื่องจากพลังงานที่ได้อยู่ในรูปพลังงานไฟฟ้าโดยตรง และเป็นพลังงานที่สะอาด โดยเฉพาะประเทศไทยซึ่งอยู่ในภูมิภาคที่ได้รับแสงอาทิตย์ค่อนข้างคงที่ตลอดทั้งปี จึงเป็นผลดีอย่างยิ่งที่จะนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ งานแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีลักษณะการใช้งานไม่ยุ่งยาก เพราะให้เอาต์พุตที่ไม่เป็นเชิงเส้น ผันแปรไปตามโหลด ปริมาณแสงที่กระทบและอุณหภูมิในสภาพแวดล้อม นอกจากนั้น ยังมีประสิทธิภาพต่ำและราคาแพง แต่เนื่องจากในปัจจุบันแผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่ง

พลังงานทดแทนที่น่าสนใจกว่าแหล่งอื่นๆ การใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์จึงต้องให้ได้คุ้มค่าต่อการลงทุน

งานวิจัยที่น่าสนใจในบทความนี้ สนใจระบบพลังงานแสงอาทิตย์ที่สามารถปฏิบัติการได้ 24 ชั่วโมง เพื่อประโยชน์ต่อการใช้งานในพื้นที่ทุรกันดารที่จำเป็น โดยมีองค์ประกอบแสดงดังรูปที่ 1 ซึ่งต้องอาศัยแหล่งจ่ายพลังงานจำนวนมาก แผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานที่ขึ้นกับสภาพอากาศ ประกอบด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งหมด 200 โมดูล แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด เป็นได้ทั้งแหล่งจ่ายพลังงานสำรองและโหลดที่มีลักษณะสมบัติไม่เป็นเชิงเส้น

จำนวนทั้งหมด 50 ลูก มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 2.5 hp พร้อมปั๊มพหุขั้ว (helical pump) เป็นโหลดพร้อมใช้งาน การใช้งานแผงเซลล์แสงอาทิตย์อย่างคุ้มค่าต้องพึ่งพาชุดควบคุมตามรอยกำลังงานสูงสุด (MPPT control) และ ดีซี/ดีซี คอนเวอร์เตอร์ เพื่อให้กำลังไฟฟ้าออกมาสูงสุด ซึ่งเรียกระบบเช่นนี้ว่าระบบพลังงานแสงอาทิตย์ งานวิจัยนี้พิจารณาวิธีให้มีการใช้พลังงานอย่างเหมาะสมที่สุด (optimization) ด้วยการกล่าวถึงรายละเอียดการหาอัตราส่วนการแปลงที่จะทำให้สามารถถ่ายโอนกำลังงานเอาต์พุตจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้ได้สูงสุด และทำการลดการสูญเสียกำลังงานต่างๆ ของมอเตอร์ เพื่อให้ได้ระบบพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูงในเชิงการใช้พลังงาน



รูปที่ 1 ระบบพลังงานแสงอาทิตย์

ตัวควบคุมตามรอยกำลังงานสูงสุด

แผงเซลล์แสงอาทิตย์มีจุดการทำงานของแรงดันและกระแสเอาต์พุตช่วงกว้างมาก แต่จุดที่ให้กำลังงานสูงสุดที่ความเข้มแสงต่างๆ มีเพียงแค่จุดเดียว กำลังงานสูงสุดสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ดังสมการที่ (1) โดยจะเพิกเฉยค่าความต้านทานขนานรอยต่อ p-n เนื่องจากมีขนาดใหญ่มาก และความต้านทานในเนื้อสารกึ่งตัวนำและจุดเชื่อมต่อเนื่องจากมีค่าน้อยมาก [1]

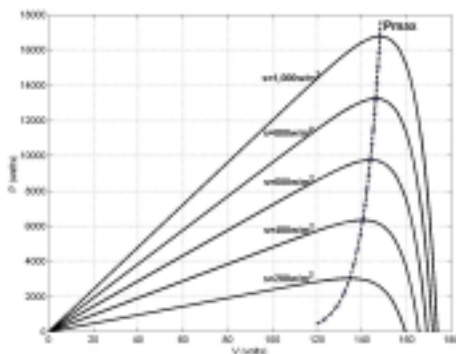
$$I = n_p I_{ph} - n_p I_{rs} \left[\exp\left(\frac{qV}{kTAn_s}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

- ซึ่ง I_{ph} คือ กระแสโฟโต (A)
- I_{rs} คือ กระแสอิ่มตัวย้อนกลับ (A)
- n_p คือ จำนวนโมดูลที่ต่อขนานกัน
- n_s คือ จำนวนเซลล์ที่ต่ออนุกรมกัน
- q คือ ค่าประจุอิเล็กตรอน (1.6×10^{-19} C)
- k คือ ค่าคงที่โบลทซ์มานน์ (1.38×10^{-23} J/K)
- A คือ ค่าตัวประกอบของรอยต่อ p-n
- T คือ อุณหภูมิของเซลล์ (K)

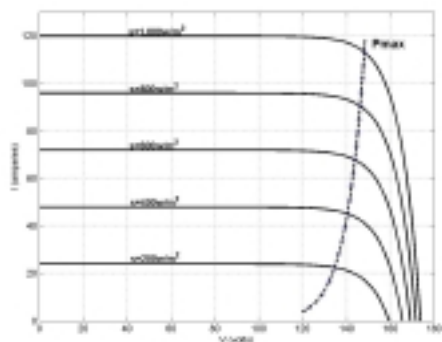
จากสมการที่ (1) คำนวณหาค่ากำลังงาน (P) แล้วหาอนุพันธ์อันดับที่หนึ่งเทียบกับ V โดยให้เท่ากับศูนย์ ($dP/dV = 0$) ซึ่งจะได้ผลลัพธ์ดังสมการที่ (2) เมื่อ $V_{P_{max}}$ คือ แรงดันที่ทำให้เกิดกำลังงานสูงสุด สามารถแก้สมการได้โดยใช้วิธีคำนวณเชิงตัวเลข ซึ่งนำไปสู่การหาค่ากำลังงานสูงสุด (P_{max}) ต่อไป

$$\left[\left(\frac{qV_{P_{max}}}{kTAn_s} \right) + 1 \right] \cdot \exp\left(\frac{qV_{P_{max}}}{kTAn_s}\right) = \frac{I_{ph} + I_{rs}}{I_{ph}} \quad (2)$$

ปัญหาที่พบคือ จุดการทำงานของโหลดอยู่ห่างจากจุดที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้กำลังงานสูงสุด จึงทำให้ได้ประโยชน์ไม่เต็มที่ ดังนั้นจึงต้องอาศัยกลไกการตามรอยกำลังงานสูงสุด (Maximum Power Point Tracker : MPPT) โดยหลักการแล้วอุปกรณ์ MPPT จะจัดการให้กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ที่ระดับสูงสุดสอดคล้องกับความเข้มแสงอาทิตย์ในขณะนั้น ดังแสดงด้วยรูปที่ 2 และ 3 ซึ่งเป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้า แรงดัน และกระแสที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งหมด 200 โมดูล ผันแปรไปตามความเข้มแสงอาทิตย์ (insolation, S)



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแสไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

การหาค่าอัตราส่วนการแปลง

ตัวควบคุม MPPT จะทำงานควบคู่ไปกับ ดีซี/ดีซี คอนเวอร์เตอร์ ซึ่งทำงานด้วยค่าอัตราส่วนการแปลง D (transformation ratio) ที่เหมาะสมกับสถานะการทำงานของแหล่งพลังงานและโหลด โดยจะแบ่งการพิจารณาค่า D ออกเป็น 3 กรณี ดังนี้

แผงเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายพลังงานโดยตรงให้แก่มอเตอร์ (D_m)

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่พิจารณาในบทความนี้เป็นแบบกระตุ้นฟลักซ์แยกส่วน ซึ่งใช้งานด้วยการปรับแรงดันอาร์เมเจอร์โดยมีความเข้มสนามเต็มพิกัด โดยที่

สถานะคงตัวแรงดันด้านอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์เมื่อขับปั๊มพ์หอยโข่งที่มีแรงบิดขึ้นอยู่กับความเร็วของมอเตอร์ กล่าวคือ $T_L = k\omega^2$ [2] แสดงได้ดังสมการที่ (3)

$$V_t = R_a I_a + k_b \left[\frac{-B/k + \sqrt{(B/k)^2 + (4k_b I_a/k)}}{2} \right] \quad (3)$$

เมื่อ V_t คือ แรงดันด้านอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ (V)

I_a คือ กระแสอาร์เมเจอร์ (A)

R_a คือ ความต้านทานอาร์เมเจอร์ (Ω)

k_b คือ ค่าคงที่ (V/rad/sec)

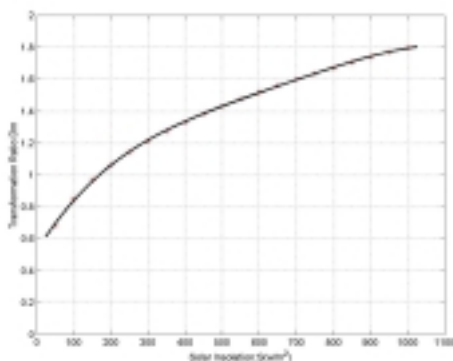
B คือ วิสคอสฟริกชันของมอเตอร์ (N.m/rad/sec)

k คือ ค่าคงที่ของปั๊มพ์ ($N\cdot m/(\text{rad}/\text{sec})^2$)

ถ้าแผงเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด (P_{max}) เพื่อใช้ขับมอเตอร์ผ่าน ดีซี/ดีซี คอนเวอร์เตอร์ จะได้สมการที่ (4) ซึ่งเมื่อแทนค่าในสมการที่ (3) จะได้สมการที่ (5) ซึ่งไม่เป็นเชิงเส้น สามารถแก้โดยใช้วิธีคำนวณเชิงตัวเลข จากนั้นนำค่า D_m ไปพล็อตกราฟเทียบกับความเข้มแสง ดังแสดงด้วยรูปที่ 4 ซึ่ง ดีซี/ดีซี คอนเวอร์เตอร์ ในกรณีนี้เป็นแบบ buck/boost converter โดยที่ความเข้มแสงต่ำกว่า 150 w/m^2 จะเป็น buck converter ซึ่งหมายความว่ากระแสที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีต่ำกว่าที่ใช้ขับโหลดได้ กรณีที่ความเข้มแสงสูงกว่านี้ converter เป็นชนิด boost ซึ่งหมายถึงกระแสที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีสูงเกินที่ต้องการขับโหลด

$$D_m = \frac{V_t}{V_{Pmax}} = \frac{I_{Pmax}}{I_a} \quad (4)$$

$$D_m - \frac{k_b}{V_{Pmax}} \left(\frac{-B}{2k} + \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{B}{k}\right)^2 + \left(\frac{4k_b I_{Pmax}}{D_m k}\right)} \right) - \frac{I_{Pmax} R_a}{D_m V_{Pmax}} = 0 \quad (5)$$



รูปที่ 4 ค่า D_m ในแต่ละความเข้มแสง

เพื่อให้หาค่า D_m ง่ายขึ้น จะเพิกเฉยเทอมแรงฝืดวิสกอสฟริกชัน (viscous friction : $B\omega$) ของมอเตอร์ เนื่องจากมีค่าน้อย [3] ดังนั้นที่สภาวะคงตัว แรงดันทางด้านอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์แสดงได้ดังสมการที่ (6) แทนค่าสมการที่ (4) ใน (6) จะได้สมการที่ (7) ซึ่งค่า D_m ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับเมื่อพิจารณาเทอมแรงฝืดวิสกอสฟริกชันในตอนต้น

$$V_t = R_a I_a + (k_b^{1.5}) \sqrt{I_a/k} \quad (6)$$

$$D_m^3 - \frac{R_a I_{Pmax}}{V_{Pmax}} D_m - \frac{(k_b^{1.5})}{V_{Pmax}} \sqrt{\frac{I_{Pmax}}{k}} = 0 \quad (7)$$

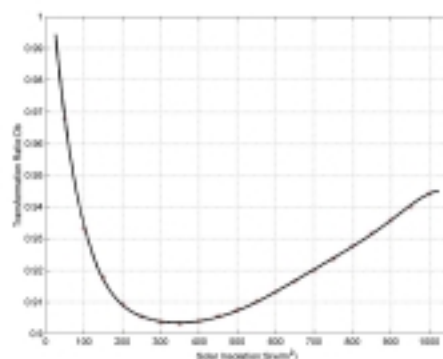
แผงเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายพลังงานโดยตรงให้แก่แบตเตอรี่ (D_b)

แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดแม้ว่าจะมีราคาถูก หาได้ง่ายในประเทศ แต่ก็มีลักษณะสมบัติการทำงานที่ไม่เป็นเชิงเส้นอย่างมากทั้งในขณะชาร์จและดิชาร์จ เพื่อง่ายในการพิจารณาหาค่า D_b สมการแรงดันของแบตเตอรี่ขณะชาร์จ จะพิจารณาลักษณะสมบัติเป็นเชิงเส้น [4] ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ (8) การหาค่า D_b มีลักษณะเหมือนในกรณีต้น ซึ่งหาได้ดังสมการที่ (9) แล้วนำค่า D_b จากการคำนวณไปพล็อตกราฟเทียบกับความเข้มแสง ดังแสดงด้วยรูปที่ 5 ซึ่งดีซี/ดีซี คอนเวอร์เตอร์ ในกรณีนี้เป็นแบบ buck converter

$$V_b = V_0 + (R_{tot} \cdot I_b) \quad (8)$$

เมื่อ V_b คือ แรงดันที่ขั้วของแบตเตอรี่ (V)
 V_0 คือ แรงดันเริ่มต้นของแบตเตอรี่ในแต่ละอัตราการชาร์จ (V) (พิจารณาที่แรงดันเริ่มต้นในช่วงที่มีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้น)
 R_{tot} คือ ความต้านทานภายในรวม (Ω)
 I_b คือ กระแสที่ชาร์จแบตเตอรี่ (A)

$$D_b = \frac{1}{2} \left[\frac{V_0}{V_{Pmax}} + \sqrt{\left(\left(\frac{V_0}{V_{Pmax}} \right)^2 + \frac{4I_{Pmax} R_{tot}}{V_{Pmax}} \right)} \right] \quad (9)$$



รูปที่ 5 ค่า D_b ในแต่ละความเข้มแสง

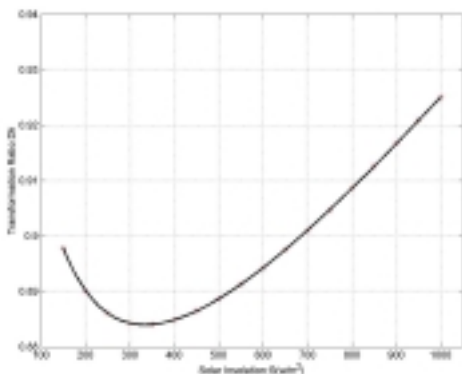
แผงเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายพลังงานให้ทั้งมอเตอร์และแบตเตอรี่ (D_p)

งานที่ปรากฏมาก่อน [5] พิจารณามอเตอร์เป็นเพียงความต้านทานตัวหนึ่งที่ต่อขนานกับแบตเตอรี่เท่านั้น แต่ในงานวิจัยนี้พิจารณามอเตอร์ตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ถูกต้อง [6] โดยค่าแรงดันที่ตกคร่อมมอเตอร์และแบตเตอรี่จะมีค่าเท่ากัน ซึ่งเท่ากับค่าแรงดันที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ ส่วนกระแสที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้จะมีค่าเท่ากับกระแสที่ใช้ในการขับมอเตอร์ร่วมกับที่ใช้ชาร์จแบตเตอรี่ ดังนั้น ถ้าแผงเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดเพื่อใช้ขับมอเตอร์และจ่ายให้แบตเตอรี่ผ่าน ดีซี/ดีซี คอนเวอร์

เตอร์ อัตราส่วนการแปลง D_h อาจตั้งต้นการพิจารณาได้ดังสมการ (10) แทนค่าสมการที่ (3) และ (8) ใน (10) จะได้สมการที่ (11) ซึ่งไม่เป็นเชิงเส้น ค่า D_h ที่คำนวณได้ถูกนำไปพล็อตกราฟเทียบกับความเข้มแสงดังแสดงด้วยรูปที่ 6 ซึ่งคือซี/ดีซี คอนเวอร์เตอร์ ในกรณีนี้เป็นแบบ buck converter โดยที่ความเข้มแสงต่ำกว่า 150 w/m^2 จะไม่สามารถหาค่า D_h ได้ เนื่องจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไม่มีกำลังงานเพียงพอที่จะจ่ายมอเตอร์และแบตเตอรี่พร้อมกัน ดังนั้นที่ความเข้มแสงต่ำกว่าค่านี้ ต้องเลือกพิจารณาว่าจะใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ขับโหลดอย่างไรอย่างหนึ่งเท่านั้น ในกรณีที่ความเข้มแสงอ่อนมากก็อาจขับโหลดไม่ได้เลย

$$D_h = \frac{V_t}{V_{P\max}} = \frac{V_b}{V_{P\max}} = \frac{I_{P\max}}{I_a + I_b} \quad (10)$$

$$\frac{k_b}{2} \sqrt{\left(\frac{B}{k}\right)^2 + 4k_b \left(\frac{I_{P\max} R_{tot} - D_h^2 V_{P\max} + D_h V_0}{D_h k R_{tot}}\right)} + R_a \left(\frac{I_{P\max} R_{tot} - D_h^2 V_{P\max} + D_h V_0}{D_h R_{tot}}\right) - D_h V_{P\max} - \frac{k_b B}{2k} = 0 \quad (11)$$



รูปที่ 6 ค่า D_h ในแต่ละความเข้มแสง

การมิไนไมซ์ กำลังงานสูญเสียในมอเตอร์

เนื่องจากกำลังงานที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีปริมาณจำกัด การขับโหลดมอเตอร์จึงต้องให้มันใจถึงการประหยัดพลังงาน ในงานวิจัยส่วนใหญ่ การพิจารณาถึงกำลังงานสูญเสียในมอเตอร์จะไม่จ่ายฟิลด์ที่พิกัด เนื่องจากกำลังงานที่มอเตอร์ต้องการส่วนใหญ่มักน้อยกว่ากำลังงานที่พิกัดอยู่แล้ว การจ่ายฟิลด์ที่มากขึ้นย่อมทำให้มอเตอร์สูญเสียกำลังงานมากขึ้นด้วย แต่ในงานวิจัยนี้ มีความจำเป็นต้องจ่ายฟิลด์เต็มพิกัดเนื่องจากพารามิเตอร์ต่างๆ ของมอเตอร์ [6] เป็นสภาวะที่ฟิลด์พิกัด

ที่สภาวะคงตัว กำลังงานของโหลดแสดงได้ดังสมการที่ (12) ซึ่งจะมีค่าเท่ากับกำลังงานขาออกของมอเตอร์ (P_{out}) ส่วนกำลังงานขาเข้าของมอเตอร์ (P_{in}) จะมีค่าเท่ากับกำลังงานขาออกของมอเตอร์รวมกับกำลังงานสูญเสียทั้งหมดของมอเตอร์ (P_{Σ}) แสดงได้ดังสมการที่ (13)

$$P_L = T_L \omega = k\omega^3 = k \left(\frac{V_t - I_a R_a}{k_b}\right)^3 \quad (12)$$

$$P_{in} = V_t I_a = P_{out} + P_{\Sigma} \quad (13)$$

ซึ่ง P_{Σ} ประกอบไปด้วย กำลังงานสูญเสียในขดลวดอาร์เมเจอร์ (armature losses), กำลังงานสูญเสียในขดลวดฟิลด์ (field winding losses), กำลังงานสูญเสียในแปรงถ่าน (brush losses), กำลังงานสูญเสียสเตร (stray losses), กำลังงานสูญเสียเนื่องจากความฝืดและแรงต้านลม (friction and windage losses) และกำลังงานสูญเสียในแกนเหล็ก (core losses)

$$\text{โดย } \text{armature losses} = I_a^2 R_a \quad (14)$$

$$\text{field winding losses} = I_f^2 R_f \quad (15)$$

$$\text{brush losses [7]} = 2I_a \quad (16)$$

stray losses มีค่าเท่ากับ 0.5% ของกำลังงาน
พิกัด (P_n) สำหรับมอเตอร์ที่มีการชดเชย แต่จะเป็น 1%
ในกรณีมอเตอร์ที่ไม่มีการชดเชย [8] ในที่นี้จะ
พิจารณาว่าเป็นมอเตอร์ที่มีการชดเชย ดังนั้น

$$\text{stray losses} = 0.5\% P_n \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \text{friction and windage losses} &= fw \cdot P_{in} \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2 \\ &= \frac{fw \cdot V_t \cdot I_a}{\omega_n^2} \left(\frac{V_t - I_a R_a}{k_b} \right)^2 \end{aligned} \quad (18)$$

ซึ่ง fw คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของความฝืดและ
แรงต้านลมที่พิกัด โดยในทางปฏิบัติ $0.02 < fw < 0.05$
[2] ในที่นี้จะพิจารณา fw มีค่าเท่ากับ 0.05

$$\text{core losses} = P_{hn} \frac{\omega I_f^2}{\omega_n I_{fn}^2} + P_{en} \left(\frac{\omega I_f}{\omega_n I_{fn}} \right)^2$$

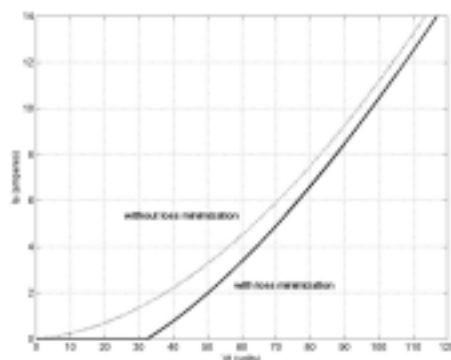
ซึ่ง P_{hn} และ P_{en} คือค่า hysteresis และ eddy
current losses ที่พิกัดตามลำดับ โดย hysteresis losses
มีค่าประมาณ 5 % ของ core losses เท่านั้น [9] เนื่อง
จากในที่นี้เป็นกรป้อนฟิลด์เต็มพิกัดคงที่ตลอด จึงได้
 $I_f = I_{fn}$ ดังนั้น

$$\text{core losses} = \frac{P_{hn}}{\omega_n} \left(\frac{V_t - I_a R_a}{k_b} \right) + \frac{P_{en}}{\omega_n^2} \left(\frac{V_t - I_a R_a}{k_b} \right)^2 \quad (19)$$

ในงานวิจัยนี้ได้พิจารณาว่าค่า core losses มี
ค่าน้อยมาก แทนค่า P_{out} และ P_{Σ} ลงในสมการที่ (13)
และทำการหาค่ากำลังงานขาเข้าสูงสุด โดยการหา
อนุพันธ์อันดับที่หนึ่งเทียบกับ I_a แล้วให้เท่ากับศูนย์
($dP_{in}/dI_a = 0$) ซึ่งจะได้ผลลัพธ์ดังสมการที่ (20)

$$\begin{aligned} &3k \left(\frac{V_t - I_a^* R_a}{k_b} \right)^2 \left(\frac{-R_a}{k_b} \right) + 2I_a^* R_a + 2 \\ &+ 2 \left(\frac{fw V_t I_a^*}{\omega_n^2} \right) \left(\frac{V_t - I_a^* R_a}{k_b} \right) \left(\frac{-R_a}{k_b} \right) \\ &+ \left(\frac{fw V_t}{\omega_n^2} \right) \left(\frac{V_t - I_a^* R_a}{k_b} \right)^2 = 0 \end{aligned} \quad (20)$$

เมื่อ I_a^* คือ กระแสอาร์เมเจอร์ที่ทำให้เกิด
กำลังงานขาเข้าของมอเตอร์สูงสุดเมื่อพิจารณากำลัง
งานสูญเสียต่าง ๆ ของมอเตอร์ โดย I_a^* จะขึ้นอยู่กับค่า
 V_t อย่างเดียวเท่านั้น เนื่องจากพารามิเตอร์ตัวอื่นๆ คงที่
หมด รูปที่ 7 เป็นการเปรียบเทียบความสัมพันธ์
ระหว่างแรงดันและกระแสอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์
เมื่อมีการพิจารณาการมิไนซ์กำลังงานสูญเสียและ
เมื่อยังไม่มีการพิจารณา ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าที่แรงดัน
อาร์เมเจอร์ค่าเดียวกันนั้น ค่ากระแสอาร์เมเจอร์เมื่อ
พิจารณาการมิไนซ์กำลังงานสูญเสียจะมีค่าน้อยกว่า
เมื่อยังไม่มีการพิจารณา



รูปที่ 7 ผลการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรง
ดันและกระแสอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ เมื่อมีการ
พิจารณาการมิไนซ์กำลังงานสูญเสีย

สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาระบบพลังงานแสงอาทิตย์ ให้มีประสิทธิภาพสูงในเชิงการใช้พลังงาน ส่วนแรกที่น่าเสนอเป็นการวินิจฉัยค่าอัตราส่วนการแปลง (D) ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทำงานของดีซี/ดีซี คอนเวอร์เตอร์ ซึ่งโดยโครงสร้างจะต้องเป็น buck/boost ค่า D ต่างๆ ที่สัมพันธ์กับความเข้มแสงอาทิตย์จะนำไปใช้เพื่อบังคับควบคุมการทำงานของอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งภายในคอนเวอร์เตอร์ ในส่วนที่สองได้แสดงรายละเอียดการมิไม่ซ์กำลังงานสูญเสียในมอเตอร์ต่อควมบีมพ์น้ำ เพื่อหาอัตรากระแสขั้วมอเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด การดำเนินงานเช่นนี้จะต้องกระทำเป็นรายกรณีขึ้นกับโหลดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพราะระบบไม่เป็นเชิงเส้น ก่อให้เกิดประโยชน์ในด้านการใช้พลังงานที่มีอย่างคุ้มค่าที่สุด

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีสำหรับทุนสนับสนุนการวิจัย และศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่อำนวยความสะดวกทางด้านเครื่องมือและสถานที่ในการปฏิบัติงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] K.H.Hussein, I.Muta, T.Hoshino, and M.Osakada, "Maximum Photovoltaic Power Tracking : an algorithm for rapidly changing atmospheric condition", *IEE Proc-Gener. Transm. Distrib.*, Vol. 142, No. 1, pp.59-64, January 1995.
- [2] Y.Yao and R.S.Ramshaw, "Optimized dc motor output in a photovoltaic system", *Can.J.Elect. & Comp.Eng.*, Vol.20, No.2, pp.79-84,1995.
- [3] M.M. Saied, A.A.Hanafy, M.A.El-Gabaly, Y.A.Safar, M.G.Jaboori, KH.A.Yamin,and A.M.Sharaf, "Optimal design parameters for a PV array coupled to a dc motor via a dc-dc transformer", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol.6, No.4, pp.593-598, December 1991.
- [4] J.Applebaum, "The Quality of Load Matching in a Direct-Coupling Photovoltaic System", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol.EC-2, No.4, pp.534-541, December 1988.
- [5] Z.Zinger and A.Braunstein, "Dynamic matching of a solar-electrical (photovoltaic) system an estimation of the minimum requirements on the matching system", *IEEE Transactions on Power Apparatus and systems*, Vol.PAS-100, No.3, pp.1189-1192, March 1981.
- [6] C.D.Sousa and K.Bose, "A fuzzy set theory based control of a phase-controlled converter dc machine drive", *IEEE Transactions on Industry Application*, Vol.30, No.1, pp.34-44, January/February 1994.
- [7] S.J.Chapman, *Electric machinery fundamentals*, 2nd ed., McGraw-Hill, 1991.
- [8] N.Margaris, T.Goutas, Z.Doulgeri, and A.Paschali, "Loss Minimization in DC Drives", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol.38, No.5, pp.328-336, October 1991.
- [9] M.Hippner, H.Yamada, and T.Miauno, "Iron Loss Analysis in Linear dc Motor", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol.35, No.5, pp.3715-3717, September 1999.

การออกแบบระบบพลังงานแสงอาทิตย์

เผด็จ เผ่าละออ¹, สราวุฒิ สุจิตจร²

¹ ผู้ช่วยวิจัย, ² รองศาสตราจารย์

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

โทร: (044)224400-1 E-mail: padej@ccs.sut.ac.th

บทนำ

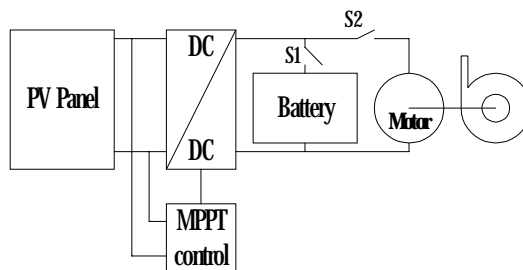
ประเทศไทยอยู่ในภูมิภาคที่ได้รับแสงอาทิตย์ค่อนข้างคงที่ ตลอดทั้งปี จึงเป็นผลคืออย่างหนึ่งที่นำพลังงานจากแสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นพลังงานที่สะอาดมาใช้ประโยชน์ การแปลงพลังงานจากแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า อาศัยเซลล์แสงอาทิตย์ที่อยู่ในรูปของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีลักษณะการใช้งานไม่ยุ่งยาก เพราะให้เอาต์พุตที่ไม่เป็นเชิงเส้น ผันแปรไปตามโหลด ปริมาณแสงที่กระทบและอุณหภูมิในสภาพแวดล้อม นอกจากนี้ ยังมีประสิทธิภาพต่ำและราคาแพง แต่เนื่องจากในปัจจุบันแผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นเพียงทางเลือกเดียว สำหรับการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์ไปเป็นพลังงานไฟฟ้าเพื่อใช้ประโยชน์ ดังนั้น การใช้งานแผงเซลล์แสงอาทิตย์จึงต้องคุ้มค่าต่อการลงทุน

งานวิจัยที่นำเสนอในบทความนี้ สนใจระบบพลังงานแสงอาทิตย์ที่สามารถปฏิบัติการได้ 24 ชั่วโมง เพื่อประโยชน์ต่อการใช้งานในพื้นที่ทุรกันดารที่จำเป็น เช่น สถานพยาบาล สถานีอนามัย ที่อาจมีเหตุการณ์ฉุกเฉินหรือแม้กระทั่งแหล่งท่องเที่ยวตามอุทยานต่างๆ การที่จะบรรลุวัตถุประสงค์ดังกล่าว จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีแหล่งพลังงานสำรองให้แก่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อพิจารณาถึงความต้องการของระบบดังกล่าวสำหรับประเทศกำลังพัฒนาแล้ว แหล่งพลังงานที่น่าเชื่อถือและราคาถูก คงเป็นแบตเตอรี่รถยนต์ ซึ่งก็ต้องยอมรับในความยุ่งยากด้านการบำรุงรักษา และลักษณะสมบัติที่ไม่เป็นเชิงเส้นอย่างมากของแบตเตอรี่ จากการใช้แหล่งพลังงานที่เป็นแผงเซลล์แสงอาทิตย์และแบตเตอรี่อยู่ในระบบเดียวกันดังกล่าว จึงเรียกระบบเช่นนี้ว่าระบบพลังงานแสงอาทิตย์ โดยมีโหลดเป็นมอเตอร์และปั๊มพ์หอยโข่ง การที่จะทำความเข้าใจให้ได้ถ่องแท้ถึงพลวัตของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นเช่นนี้นั้น คงต้องอาศัยความรู้ทางด้านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบ บทความนี้จึงได้กล่าวถึงรายละเอียดแบบจำลองที่ต่อควมกันเป็นระบบดังรูปที่ 1 พร้อมระบุค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ให้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้โดยตรง เพื่อนำไปสู่การอธิบายถึงกระบวนการในการออกแบบจำนวนของแผงเซลล์แสงอาทิตย์และแบตเตอรี่ที่เหมาะสมของระบบพลังงานแสงอาทิตย์ โดยมีวัตถุประสงค์ในการประหยัดพลังงาน และได้ระบบพลังงานแสงอาทิตย์ ที่มีประสิทธิภาพสูงเชิงการใช้พลังงาน

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

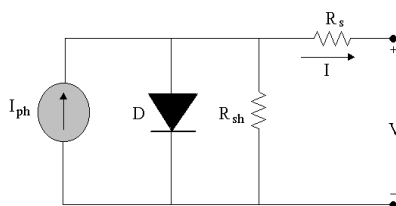
ระบบพลังงานแสงอาทิตย์มีองค์ประกอบดังรูปที่ 1 มอเตอร์ขนาด 2.5 hp พร้อมปั๊มพ์หอยโข่งเป็นโหลดที่ต้องใช้งานตลอด 24 ชั่วโมง ซึ่งต้องอาศัยแหล่งจ่ายพลังงานจำนวนมาก ประกอบด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ขึ้นกับสภาพอากาศ และแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดซึ่งในบางขณะก็จะทำหน้าที่เป็นโหลด การใช้งานแผงเซลล์แสงอาทิตย์

อย่างคุ้มค่าต้องพึ่งพาชุดควบคุมตามรอยกำลังงานสูงสุด (MPPT control) และ ดีซี/ดีซี คอนเวอร์เตอร์ เพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้าออกมาสูงสุดสำหรับใช้ประโยชน์



รูปที่ 1 ระบบพลังงานแสงอาทิตย์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ศึกษาได้จากวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ [4] ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2 ปกติความต้านทานขนานรอยต่อ p-n (R_{sh}) จะมีค่าใหญ่มาก และความต้านทานในเนื้อสารกึ่งตัวนำและจุดเชื่อมต่อ (R_s) จะมีค่าน้อยมาก แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แสดงความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จึงเขียนแสดงได้ดังสมการที่ (1)



รูปที่ 2 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์

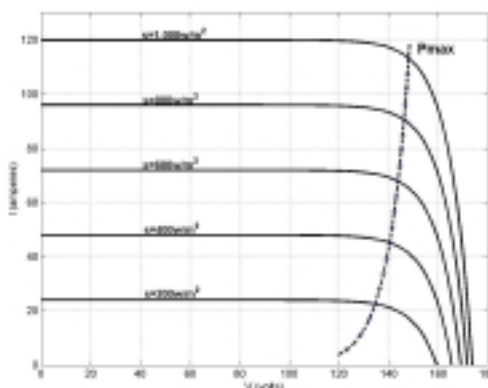
$$I = n_p I_{ph} - n_p I_{rs} \left[\exp\left(\frac{qV}{kTAn_s}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

- ซึ่ง
- I_{ph} คือ กระแสโฟโต (A)
 - I_{rs} คือ กระแสอิ่มตัวย้อนกลับ (A)
 - n_p คือ จำนวน โมดูลที่ต่อขนานกัน
 - n_s คือ จำนวนเซลล์ที่ต่ออนุกรมกัน
 - q คือ ค่าประจุอิเล็กตรอน (1.6×10^{-19} C)
 - k คือ ค่าคงที่โบลทซ์มานน์ (1.38×10^{-23} J/K)
 - A คือ ค่าตัวประกอบของรอยต่อ p-n
 - T คือ อุณหภูมิของเซลล์ (K)

ข้อมูลในการจำลองผล ใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ของซีเมนส์ SP-75W [5] โมดูลหนึ่งประกอบด้วยเซลล์ทั้งหมด 36 เซลล์ต่ออนุกรมกัน มีค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้

- ความเข้มแสง 1000 W/m^2 (peak power)
- อุณหภูมิ 25°C (298 K); $A=1.2$
- กำลังไฟฟ้าพิกัด 75 W ; กระแสพิกัด 4.4 A
- แรงดันพิกัด $14\text{--}17 \text{ V}$; $I_{ph}=4.8 \text{ A}$
- แรงดันขณะเปิดวงจร 21.7 V ; $R_s \approx 0 \Omega$

กรณีแผงเซลล์แสงอาทิตย์ SP-75W นี้ ค่า $n_s=36$ ขณะที่ $n_p=1$ จากสมการที่ (1) เมื่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไม่มีโหลด คำนวณได้ว่า $I_{ss}=1.5619\text{E-}8 \text{ A}$ โดยสมมติให้อุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์คงที่ตลอด การใช้งานแผงเซลล์แสงอาทิตย์อย่างคุ้มค่า ต้องอาศัยกลไกการตามรอยกำลังงานสูงสุดหรือ MPPT โดยหลักการแล้วอุปกรณ์ MPPT จะจัดการให้กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ที่ระดับสูงสุดสอดคล้องกับความเข้มแสงอาทิตย์ (S) ในขณะนั้น ดังแสดงด้วยรูปที่ 3 ซึ่งเป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ผันแปรไปตามความเข้มแสงอาทิตย์ ในทางปฏิบัติตัวควบคุม MPPT ทำงานควบคู่ไปกับ ดีซี/ดีซี คอนเวอร์เตอร์ ซึ่งจะต้องทำงานด้วยอัตราส่วนการแปลง D (transformation ratio) ที่เหมาะสมกับสภาวะการทำงานของแหล่งพลังงานและโหลด



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแสไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดเป็นแหล่งพลังงานสำรองให้แก่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีราคาถูก หาได้ง่ายในประเทศ แต่ก็มีลักษณะสมบัติการทำงานที่ไม่เป็นเชิงเส้นอย่างมากทั้งในขณะชาร์จและดิสชาร์จ สมการที่ (2) อธิบายกระบวนการชาร์จและดิสชาร์จ [8] รูปสมการที่ปรากฏขณะนี้ใช้สำหรับช่วงการดิสชาร์จ สำหรับช่วงชาร์จเครื่องหมายลบทางด้านขวาของสมการที่ (2) จะเปลี่ยนเป็นบวกทั้งหมด

$$V_b = V_0 - (R_{tot} \cdot I) - \left[K1 \cdot \frac{I^n}{C} \right] \cdot t - \left[\frac{K2}{C - I^n \cdot t} \right] \quad (2)$$

ซึ่ง V_b คือ แรงดันที่ขั้วของแบตเตอรี่ (V)

V_0 คือ แรงดันเริ่มต้นของแบตเตอรี่ (V)

R_{tot} คือ ความต้านทานภายในรวม (Ω)

I คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลในแบตเตอรี่ (A)

C คือ ค่าความจุของแบตเตอรี่ (Ah)

t คือ เวลาที่ใช้ในการดิสชาร์จ (ชาร์จ) แบตเตอรี่ (h)

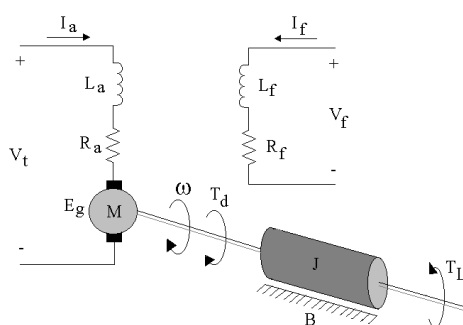
n คือ Peukert's exponent

$K1$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์จาก Peukert's equation

$K2$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ทำให้แรงดันตก (เพิ่ม) กระทั่งหมดเมื่อแบตเตอรี่ดิสชาร์จ (ชาร์จ) ใกล้เคียงหมด (เต็ม)

จากสมการที่ (2) จะพิจารณาเฉพาะช่วงสภาวะคงตัวเท่านั้น ซึ่งสภาวะชั่วคราวเกิดขึ้นได้ในจังหวะที่แบตเตอรี่เปลี่ยนการทำงานจากสภาวะชาร์จเป็นดิสชาร์จ และกลับไปด้วยช่วงเวลาที่สั้นมากคิดเป็นเพียงมิลลิวินาที จึงไม่คำนึงถึงในที่นี้ ดังนั้น จึงพิจารณาวัฏจักรการทำงานของแบตเตอรี่เป็น 3 ช่วง [9] กล่าวคือ ช่วงชาร์จด้วยกระแสคงที่หรือ CCC ช่วงชาร์จด้วยแรงดันคงที่หรือ CVC และช่วงดิสชาร์จด้วยกระแสคงที่หรือ CCD ข้อมูลในการจำลองผล ใช้แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดของ CELTIC [6] แรงดันปกติ 12 V ค่าความจุพิกัด 70 Ah ค่า R_{tot} ขณะดิสชาร์จและชาร์จเท่ากับ $6.15 E^{-2} \Omega$ และ $6.56 E^{-2} \Omega$ ตามลำดับ ค่า $K1$ และ $K2$ ขณะดิสชาร์จและชาร์จมีค่าเท่ากันเท่ากับ 0.90 และ 2.2 ตามลำดับ และค่า n ขณะดิสชาร์จและชาร์จเท่ากับ 1.16 และ 1.00 ตามลำดับ ส่วนค่าช่วงแรงดันขณะดิสชาร์จมีค่าแรงดันสูงสุด 13.3 V และแรงดันต่ำสุด 11.5 V และค่าช่วงแรงดันขณะชาร์จมีค่าแรงดันต่ำสุด 11.8 V และแรงดันสูงสุด 14.1 V

การหาแบบจำลองมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่พิจารณาในบทความนี้เป็นแบบกระตุ้นฟิลด์แยกส่วน โดยมีวงจรสมมูลดังรูปที่ 4 [7] เมื่อใช้งานมอเตอร์ด้วยการปรับแรงดันอาร์เมเจอร์โดยมีความเข้มสนามเต็มพิกัดสามารถอธิบายการทำงานของมอเตอร์ด้วยแบบจำลองดังสมการที่ (3)



รูปที่ 4 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

$$\begin{bmatrix} \frac{dI_a}{dt} \\ \frac{d\omega}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_a & -k_b \\ L_a & L_a \\ k_t & -B \\ J & J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ L_a & 0 \\ 0 & -1 \\ J & J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_t \\ T_L \end{bmatrix} \quad (3)$$

เมื่อ V_t คือ แรงดันที่ป้อนให้มอเตอร์ทางด้านอาร์เมเจอร์ (V)

I_a คือ กระแสอาร์เมเจอร์ (A)

L_a คือ ความเหนี่ยวนำทางด้านอาร์เมเจอร์ (H)

R_a คือ ความต้านทานอาร์เมเจอร์ (Ω)

ω คือ ความเร็วเชิงมุม (rad/sec)

J คือ โมเมนต์แรงเฉื่อยของมอเตอร์ ($\text{Kg}\cdot\text{m}^2$)

B คือ วิสคอสฟริกชันของมอเตอร์ ($\text{N}\cdot\text{m}/\text{rad}/\text{sec}$)

E_g คือ แรงดันย้อนกลับ: $k_b\omega$ (V)

T_L คือ แรงบิดของโหลด (N.m)

ข้อมูลในการจำลองผลของมอเตอร์ [10] มีดังนี้

- ขนาดพิกัด 110 V, 20 A, 2.5 hp, 1800 rpm, 9.89 N-m

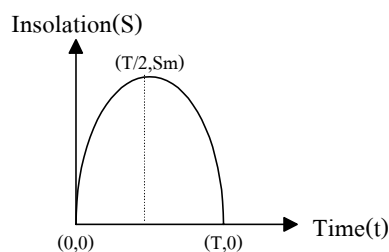
- $R_a = 0.6 \Omega$, $L_a = 8 \text{ mH}$

- $J = 0.0465 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$, $B = 0.004 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{sec}/\text{rad}$

- $k_t (\text{N}\cdot\text{m}/\text{A}) = k_b (\text{V}/\text{rad}/\text{sec}) = 0.55 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{A}$

โหลดที่มอเตอร์ขับในที่นี่คือปั๊มพหอยโข่ง (helical pump) ซึ่งมีแรงบิดขึ้นอยู่กับความเร็วของมอเตอร์ กล่าวคือ $T_L = k\omega^2$ ซึ่ง k คือค่าคงที่ของปั๊ม มีค่าเท่ากับ $1.898 \cdot 10^{-4} \text{ N}\cdot\text{m}/(\text{rad}/\text{sec})^2$ [11] เมื่อพิจารณาการมีนิไมซ์ กำลังสูญเสียในมอเตอร์ กระแสอาร์เมเจอร์จะเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ 12.49 A เท่านั้น ซึ่งมีค่าน้อยกว่าเมื่อยังไม่มีการพิจารณา (13.25 A)

ส่วนแบบจำลองความเข้มแสงอาทิตย์ หาได้จากข้อมูลดาวเทียม GMS 4 และ GMS 5 ตั้งแต่เดือน มกราคม 2536 ถึง ธันวาคม 2541 ค่าเฉลี่ยความเข้มแสงอาทิตย์ (insolation, S) ทั่วประเทศไทยจากทุกพื้นที่จะมีค่าเท่ากับ $18.2 \text{ MJ}/\text{m}^2/\text{day}$ [1] หรือโดยประมาณเท่ากับ $5 \text{ kw}\cdot\text{hr}/\text{m}^2/\text{day}$ โดยบทความ [3] ได้เสนอค่าความเข้มแสงอาทิตย์มีลักษณะเป็นรูปพาราโบลาระฆังคว่ำ ดังรูปที่ 5 ซึ่งเป็นค่าความเข้มแสงที่สอดคล้องกับความเป็นจริงในวันที่ฟ้าเปิด (sunny day) เมื่อ A คือพื้นที่ใต้กราฟของรูป และ p คือระยะจากจุดยอดไปตามแกนพาราโบล่า จะได้



รูปที่ 5 ลักษณะของรูปพาราโบลาระฆังคว่ำ

$$A = \int_0^T S dt = \int_0^T S_m dt - \frac{1}{4p} \int_0^T \left(t - \frac{T}{2} \right)^2 dt = S_m T - \frac{T^3}{48p} \quad (4)$$

จะได้ค่าความเข้มแสง S สัมพันธ์กับเวลา t ดังสมการที่ (5)

$$S = \frac{3}{2} \left(\frac{A}{T} \right) - \frac{6A}{T^3} \left(t - \frac{T}{2} \right)^2 \quad (5)$$

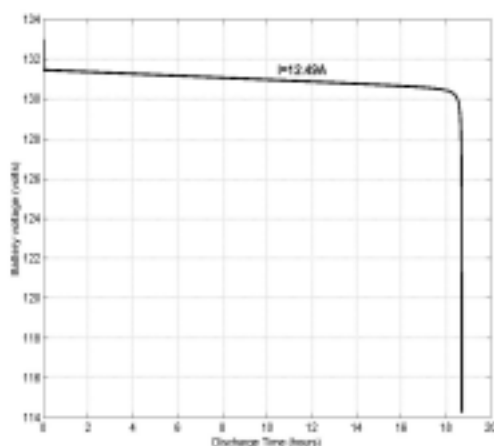
โดยพื้นที่ใต้กราฟ A เท่ากับ $5,000 \text{ w.hr/m}^2/\text{day}$ และใน 1 วัน จะกำหนดให้มีแสงอาทิตย์ทั้งหมด 8 ชั่วโมง (08.00-16.00 น.) ดังนั้น $T = 8 \text{ hr}$. ซึ่งจากสมการที่ (5) จึงได้

$$S = 937.5 - 58.59(t - 4)^2 \quad (6)$$

การออกแบบระบบพลังงานแสงอาทิตย์

จากนี้จะเป็นการอธิบายถึง กระบวนการในการคำนวณหาจำนวนของแผงเซลล์แสงอาทิตย์และแบตเตอรี่ที่เหมาะสมของระบบพลังงานแสงอาทิตย์ โดยจะพิจารณาว่า ระบบต้องใช้งานได้ต่อเนื่องตลอด 24 ชั่วโมง ซึ่งหลักในการออกแบบระบบ จะต้องนำเซลล์แสงอาทิตย์, แบตเตอรี่และมอเตอร์พร้อมปั๊ม มาพิจารณาร่วมกันเป็นระบบ โดยต้องมีจำนวนของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพียงพอที่จะผลิตพลังงานไฟฟ้าเพื่อนำไปชาร์จแบตเตอรี่ พร้อมทั้งจ่ายให้แก่มอเตอร์ภายในช่วงระยะเวลาที่มีแสง ส่วนช่วงระยะเวลาที่ไม่มีแสง ที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ไม่สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ ก็เป็นหน้าที่ของแบตเตอรี่ที่ต้องดิสชาร์จพลังงานไฟฟ้าให้แก่มอเตอร์ต่อ โดยแบตเตอรี่จะต้องมีพลังงานเพียงพอที่จะดิสชาร์จได้ตลอดช่วงระยะเวลาที่ไม่มีแสงนี้ด้วย

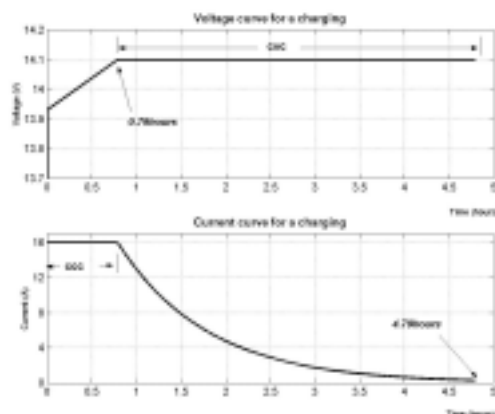
ในการหาจำนวนของแบตเตอรี่ เนื่องจากทราบค่าพิกัดแรงดันของมอเตอร์แล้ว อันดับแรกจึงทำการคำนวณหาจำนวนลูกของแบตเตอรี่ที่อนุกรมในแต่ละแผงเสียก่อน โดยค่าแรงดันที่ได้จากการออกแบบ จะต้องมีความเพียงพอที่จะใช้ในสภาวะการดิสชาร์จให้แก่มอเตอร์ขนาดพิกัด 110 V ซึ่งจากการพิจารณาจะได้จำนวนแบตเตอรี่ที่อนุกรมต่อแผงเท่ากับ 10 ลูก เพราะทำให้แบตเตอรี่มีแรงดันปกติกลายเป็น 120 V ซึ่งมีความเพียงพอในการดิสชาร์จให้แก่มอเตอร์ จากนั้นทำการคำนวณหาจำนวนแผงที่ต่อขนานกันของแบตเตอรี่ เนื่องจากเราทราบค่ากระแสของมอเตอร์เมื่อพิจารณาการมิเนิมัซกำลังสูญเสียในมอเตอร์เท่ากับ 12.49 A ซึ่งการออกแบบจำนวนแผงที่ต่อขนานกัน จะต้องพิจารณาถึงระยะเวลาที่ใช้ในการดิสชาร์จให้แก่มอเตอร์ โดยแบตเตอรี่จะต้องมีพลังงานเพียงพอที่จะดิสชาร์จได้ตลอดช่วงระยะเวลาที่ไม่มีแสง ซึ่งใน 1 วัน กำหนดให้มีแสงประมาณ 8 ชั่วโมง ดังนั้นแบตเตอรี่จะต้องมีพลังงานเพียงพอที่จะดิสชาร์จได้ภายในช่วงระยะเวลาที่ไม่มีแสง 16 ชั่วโมง ซึ่งจากการคำนวณด้วยโปรแกรมโดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ผ่านมาในข้างต้น จะได้จำนวนแผงที่ต่อขนานกันของแบตเตอรี่มีค่าเท่ากับ 5 แผง ซึ่งมีความเพียงพอในการดิสชาร์จให้แก่มอเตอร์เกินกว่าระยะเวลา 16 ชั่วโมงที่ไม่มีแสง ดังแสดงด้วยรูปที่ 6 ดังนั้นจากการออกแบบจึงได้ว่า *แบตเตอรี่มีจำนวนทั้งหมด 50 ลูก ต่อเป็นแผงขนานกัน 5 แผง ซึ่งแต่ละแผงมีแบตเตอรี่ 10 ลูก ต่ออนุกรมกันอยู่*



รูปที่ 6 การดิสชาร์จพลังงานของแบตเตอรี่ให้แก่มอเตอร์

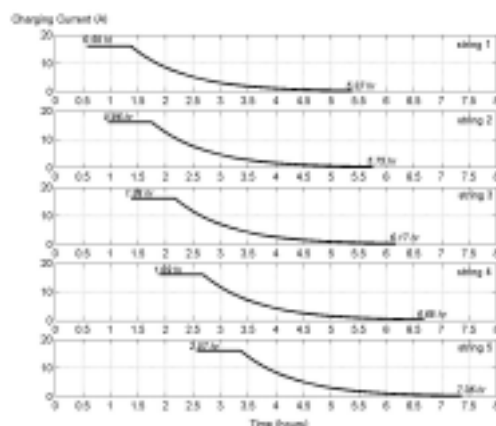
ส่วนการหาจำนวนโมดูลของเซลล์แสงอาทิตย์นั้น ต้องหาจำนวนโมดูลที่อนุกรมต่อแผงเป็นอันดับแรกก่อน โดยค่าแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ต้องมีความเพียงพอสำหรับแบตเตอรี่ขนาดพิกัด 120 V และเพียงพอสำหรับมอเตอร์ 110 V ซึ่งจากการพิจารณาจะได้จำนวนโมดูลของเซลล์แสงอาทิตย์ที่อนุกรมต่อแผงเท่ากับ 8 เพราะทำให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์มีแรงดันพิกัดกลายเป็น 120 V ซึ่งมีความเพียงพอที่จะจ่ายให้แก่มอเตอร์และมอเตอร์ จากนั้นจึงคำนวณหาจำนวนโมดูลที่ต้องขนานกันของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยต้องมีกระแสเพียงพอที่จะจ่ายให้มอเตอร์ 12.49 A และชาร์จแบตเตอรี่ทั้งหมด 50 ลูกให้เต็มภายในระยะเวลา 8 ชั่วโมงที่มีแสง โดยในบทความนี้ แบตเตอรี่ทุกลูกจะมี charge equalizer สำหรับคงค่าแรงดันในขณะที่ชาร์จให้เท่ากันทุกๆ ลูก ดังนั้นเราจึงพิจารณาการชาร์จแบตเตอรี่ออกเป็นลูกๆ ได้ โดยแบ่งการชาร์จออกเป็น 2 ช่วง ได้แก่ CCC และ CVC ช่วง CCC เป็นการชาร์จด้วยอัตรากระแสสูงคงที่ค่าหนึ่ง ในช่วง CCC ค่าแรงดันแบตเตอรี่จะเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วจนกระทั่งถึงค่าแรงดันสูงสุด จากนั้นก็ดำเนินการชาร์จในช่วง CVC ต่อทันที ก่อนที่จะเกิดแรงดันเกินในแบตเตอรี่ ในช่วง CVC ต้องทำการลดปริมาณกระแสในการชาร์จแบตเตอรี่ลงแบบเอ็กซ์โปเนนเชียลจนเกือบเป็นศูนย์ เพื่อรักษาแรงดันในช่วง CVC ให้คงที่อยู่ที่ระดับสูงสุดประมาณ 4 ชั่วโมง จึงจะทำให้แบตเตอรี่ได้รับการชาร์จอย่างสมบูรณ์ [2]

แบตเตอรี่ในบทความนี้ จะเริ่มชาร์จไม่พร้อมกัน โดยจะเริ่มชาร์จเป็นลำดับทีละแผงตามค่าความเข้มแสงที่พอเพียงต่อแบตเตอรี่แผงนั้นๆ การคำนวณหาอัตราการกระแสในการชาร์จแบตเตอรี่ต่อลูกในแต่ละแผงที่พอเหมาะนั้น จะต้องคำนึงถึงเวลาที่แบตเตอรี่ใช้ในการชาร์จให้สอดคล้องกับช่วงเวลาที่มิแสงเป็นหลัก โดยการชาร์จแบตเตอรี่ให้เต็มทั้ง 5 แผง จะต้องใช้เวลาทั้งหมดอยู่ในช่วงที่มีแสง 8 ชั่วโมง ซึ่งจากการคำนวณด้วยโปรแกรม จะได้ค่าอัตราการกระแสในการชาร์จแบตเตอรี่ต่อลูกในแต่ละแผงของช่วง CCC ที่พอเหมาะเท่ากับ 16 A ดังแสดงด้วยรูปที่ 7 โดยถ้าต่ำกว่าค่านี้ จะทำให้เวลาที่ชาร์จเต็มไม่เหมาะสมกับช่วงระยะเวลาที่มีแสงอย่างจำกัด แต่ถ้าสูงกว่าค่านี้ จะเกิดแรงดันเกินในแบตเตอรี่ ทำให้อายุการใช้งานสั้นลง จากรูปที่ 7 เป็นการแสดงการชาร์จแบตเตอรี่ต่อลูกในแต่ละแผงด้วยอัตราการชาร์จ 16 A ในช่วง CCC และอัตราการชาร์จ $16 \cdot \exp(-t)$ ในช่วง CVC แบตเตอรี่หนึ่งแผง จะใช้เวลาในการชาร์จทั้งหมด 4.79 ชั่วโมง โดยใช้เวลาในการชาร์จช่วง CCC เท่ากับ 0.79 ชั่วโมง และใช้เวลาในการชาร์จช่วง CVC เท่ากับ 4 ชั่วโมง เมื่อพิจารณาประกอบการคำนวณแล้วว่า แบตเตอรี่แต่ละแผงจะเริ่มชาร์จไม่พร้อมกัน โดยจะเริ่มชาร์จเป็นลำดับทีละแผงไป จะมีความเหมาะสมกับระยะเวลาที่มีแสง 8 ชั่วโมง

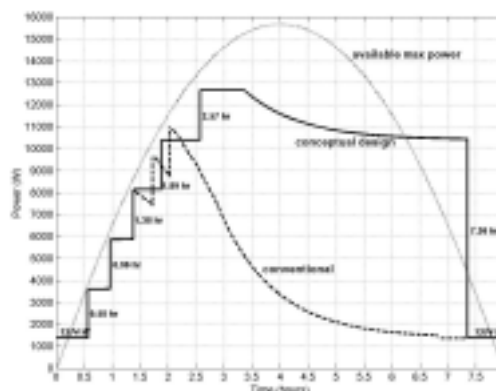


รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสเทียบกับเวลาของแบตเตอรี่ขณะชาร์จ

การหาจำนวนโมดูลที่ต่อขนานกันของเซลล์แสงอาทิตย์ จะพิจารณาถึงค่ากระแสที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ มีความเพียงพอที่จะชาร์จแบตเตอรี่ให้เต็มทั้ง 5 แผง ภายในระยะเวลาที่มีแสง 8 ชั่วโมง เมื่อหักส่วนที่จ่ายให้มอเตอร์ออกแล้ว 12.49 A หรือไม่ ซึ่งจากข้างต้น การชาร์จแบตเตอรี่แต่ละแผงใช้กระแสช่วง CCC เท่ากับ 16 A ดังนั้นแบตเตอรี่ทั้ง 5 แผง จึงใช้กระแสช่วง CCC ทั้งหมดเท่ากับ 80 A และค่าความเข้มแสงอาทิตย์ก็มีลักษณะเป็นรูปพาราโบลากระฉิงกว่า ดังนั้นแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะต้องผลิตกระแสเมื่อหักส่วนที่จ่ายให้มอเตอร์ออกแล้ว ให้มีค่าน้อยเท่ากับ 80 A ก่อนถึงจุดที่ความเข้มแสงมีค่าสูงสุดที่จุดยอดของระฆังเป็นเวลาน้อยเท่ากับ ช่วง CCC นั่นเอง ทั้งนี้เพราะ วันหนึ่งมีแสงประมาณ 8 ชั่วโมง ดังนั้นความเข้มแสงสูงสุดที่จุดยอดของระฆังจะอยู่ที่เวลานับตั้งแต่เริ่มมีแสงเท่ากับ 4 ชั่วโมง โดยใน 4 ชั่วโมงแรกจะมีค่าความเข้มแสงเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ส่วนใน 4 ชั่วโมงหลังจะมีค่าลดลงเรื่อยๆ ซึ่งเวลา 4 ชั่วโมงหลังนี้เองที่แบตเตอรี่แผงที่ 5 ใช้ในการชาร์จช่วง CVC เนื่องจากในช่วง CVC อัตรากระแสในการชาร์จนั้นลดน้อยลงสอดคล้องกับความเข้มแสงอาทิตย์เช่นกัน ส่วนเวลาช่วงท้ายของ 4 ชั่วโมงแรกนั้น แบตเตอรี่แผงที่ 5 จะใช้ในการชาร์จช่วง CCC เนื่องจากในช่วง CCC แบตเตอรี่แผงที่ 5 ยังต้องการกระแสในการชาร์จคงที่อยู่ ซึ่งค่าความเข้มแสงในช่วงท้ายของ 4 ชั่วโมงแรกก็เพียงพออยู่แล้ว ทั้งนี้เพราะความเข้มแสงใน 4 ชั่วโมงแรกมีค่าเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ นั่นเอง จากการคำนวณด้วยโปรแกรมจะได้จำนวนโมดูลที่ต่อขนานกันของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเท่ากับ 25 ดังนั้นจากการออกแบบจึงได้ว่า เซลล์แสงอาทิตย์มีจำนวนทั้งหมด 200 โมดูล ต่อเป็นแผงขนานกัน 25 แผง ซึ่งแต่ละแผงมีเซลล์แสงอาทิตย์ 8 โมดูลต่ออนุกรมกันอยู่ โดยกระแสที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ 200 โมดูลเมื่อหักส่วนที่จ่ายให้มอเตอร์ออกแล้ว จะมีความเพียงพอในการชาร์จแบตเตอรี่ทั้ง 5 แผง ดังแสดงด้วยรูปที่ 8 ส่วนกำลังงานที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ภายในระยะเวลาที่มีแสง 8 ชั่วโมง และกำลังงานที่มอเตอร์และแบตเตอรี่ต้องการที่ได้จากการออกแบบเทียบกับที่ต้องใช้จริง แสดงได้ด้วยรูปที่ 9 ดังนี้



รูปที่ 8 อัตรากระแสและเวลาในการชาร์จแบตเตอรี่ทั้ง 5 แผง



รูปที่ 9 ความต้องการกำลังงานของมอเตอร์และแบตเตอรี่

จากรูปที่ 8 กระแสจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่นำมาชาร์จแบตเตอรี่ได้หักส่วนที่จ่ายให้มอเตอร์ออกแล้ว 12.49 A การชาร์จทำได้เสร็จสิ้นภายในระยะเวลาที่มีแสง 8 ชั่วโมง โดยการชาร์จแบตเตอรี่แผงที่ 1, 2, 3, 4 และ 5 จะต้องรอให้กระแสมีปริมาณถึง 16, 32, 48, 64 และ 80 A ตามลำดับก่อน แบตเตอรี่แผงที่ 1, 2, 3, 4 และ 5 จะเริ่มชาร์จที่เวลา 0.58, 0.96, 1.38, 1.89 และ 2.57 ชั่วโมงตามลำดับ และสิ้นสุดการชาร์จที่เวลา 5.37, 5.75, 6.17, 6.68 และ 7.36 ชั่วโมงตามลำดับ (หมายเหตุ: เวลาที่ 0 หมายถึง 08.00 น. และที่ 8 ชั่วโมง หมายถึง 16.00 น.) ส่วนรูปที่ 9 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่ามากเกินพอในการชาร์จแบตเตอรี่และจ่ายให้มอเตอร์ตลอดทั้งช่วงเวลาที่ มีแสง โดยจะต้องจ่ายให้มอเตอร์ปริมาณ 1374 W เป็นฐานทุกกรณีก่อนที่จะชาร์จแบตเตอรี่ ทั้งนี้เนื่องจากการออกแบบเพื่อคำนวณหาจำนวนของแผงเซลล์แสงอาทิตย์และแบตเตอรี่ในข้างต้น ไม่ได้นำช่วง CVC ของแบตเตอรี่แต่ละแผงมาพิจารณาประกอบการชาร์จ ซึ่งในช่วงนี้อัตรากระแสในการชาร์จนั้นได้ลดลงแบบเอ็กซ์โปเนนเชียลแล้ว จึงส่งผลให้กำลังไฟฟ้าที่แบตเตอรี่ต้องการใช้ในการชาร์จที่ได้จากการออกแบบ มีค่าสูงกว่ากำลังไฟฟ้าที่แบตเตอรี่ต้องการใช้ในการชาร์จจริงอยู่มาก ดังนั้นงานในขั้นต่อไป ควรที่จะสร้างตัวควบคุมกำลังการ (supervisory controller) เพื่อควบคุมการชาร์จให้ดำเนินไปอย่างสอดคล้องกับลักษณะสมบัติของแบตเตอรี่ตามการชาร์จจริง และทำการวิเคราะห์การใช้พลังงานในระบบเพื่อให้ได้ระบบพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูงและคุ้มค่าต่อการลงทุน

สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอระบบพลังงานแสงอาทิตย์ที่สามารถปฏิบัติการได้ 24 ชั่วโมง โดยกล่าวถึง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบพลังงานแสงอาทิตย์พร้อมทั้งระบุค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ให้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้โดยตรง เพื่อนำไปสู่การอธิบายถึงกระบวนการในการออกแบบจำนวนของแผงเซลล์แสงอาทิตย์และแบตเตอรี่ที่เหมาะสมของระบบพลังงานแสงอาทิตย์ โดยมีวัตถุประสงค์ในการประหยัดพลังงาน และได้ระบบพลังงานแสงอาทิตย์ ที่มีประสิทธิภาพสูงในเชิงการใช้พลังงาน

เอกสารอ้างอิง

- [1] มหาวิทยาลัยศิลปากร และ กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน. (ม.ป.ป.). แผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์จากข้อมูลดาวเทียมสำหรับประเทศไทย (Solar Radiation Map of Thailand) [ซีดี]. กรุงเทพฯ: กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงานร่วมกับมหาวิทยาลัยศิลปากร.
- [2] Casacca, M.A., Capobianco, M.R., and Salameh, Z.M. (1996). Lead acid battery storage configuration for improved available capacity. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 11(1): 139-145.
- [3] Harrington, S., Corporation, K., and Dunlop, J. (1992). Battery charge controller characteristics in photovoltaic systems. *IEEE AES MAGAZINE*: 15-21.
- [4] Hussein, K. H., Muta, I., Hoshino, T., and Osakada, M. (1995). Maximum photovoltaic power tracking : An algorithm for rapidly changing atmospheric condition. *IEE Proc-Gener. Transm. Distrib.* 142 (1): 59-64.
- [5] Pan, C., Chen, J., Chu, C., and Huang, Y. (1999). A fast power point tracker for photovoltaic power system. *Industrial Electronics Society, 1999. IECON'99 Proceedings*. 1: 390-393.
- [6] Protogeropoulos, C., Marshall, R. H., and Brinkworth, B. J. (1994). Battery state of voltage modelling and an algorithm describing dynamic conditions for long-term storage simulation in a renewable system. *Solar Energy*. 53 (6): 517-527.
- [7] Ramamurthi, V.P. and Subrahmanyam, V. (1991). Performance of a separately excited dc motor fed from a multiphase chopper. *TENCON'91.1991 IEEE Region 10 International Conference on EC3-Energy, Computer, Communication and Control Systems*. 1: 238-241.
- [8] Rynkiewicz, R. (1999). Discharge and charge modeling of lead acid batteries, *Applied Power Electronics Conference and Exposition. IEEE*. 2: 707-710.
- [9] Salameh, Z.M., Casacca, M.A., and Lynch, W.A. (1992). A mathematical model for lead-acid batteries. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 7 (1): 93-97.
- [10] Sousa, C.D. and Bose, K. (1994). A fuzzy set theory based control of a phase-controlled converter dc machine drive. *IEEE Transactions on Industry Application*. 30 (1): 34-44.
- [11] Yao, Y. and Ramshaw, R.S. (1995). Optimized dc motor output in a photovoltaic system. *Can.J.Elect. & Comp.Eng.* 20 (2): 79-84.

ที่ ทม 5145/ว.๖



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี
อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

๒๖ มีนาคม 2545

เรื่อง แจ้งผลการพิจารณาบทความคัดย่องานวิจัย เพื่อนำเสนอในการประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาของประเทศไทย ครั้งที่ 3
เรียน นายเผด็จ เผ่าละออ

สิ่งที่ส่งมาด้วย 1. รูปแบบการจัดทำบทความเพื่อตีพิมพ์ในสื่อรวมบทความวิชาการ (Proceeding)
2. แบบแสดงความจำนงเข้าร่วมการประชุม

ตามที่ท่านได้ส่งบทความคัดย่อผลงานวิจัย เพื่อนำเสนอในการประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาของประเทศไทย ครั้งที่ 3 ระหว่างวันที่ 18 – 19 กรกฎาคม 2545 ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นั้น

คณะกรรมการฝ่ายวิชาการจัดการประชุมฯ ขอแจ้งผลการพิจารณา ดังนี้

ผลงานวิจัยของ นายเผด็จ เผ่าละออ เรื่อง การออกแบบและอนุวัตตัวควบคุมพีชชีเพื่อจัดการพลังงานในระบบพลังงานแสงอาทิตย์ ได้รับการพิจารณาให้นำเสนอในการประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาของประเทศไทย ครั้งที่ 3 ระหว่างวันที่ 18 – 19 กรกฎาคม 2545 ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยจัดอยู่ในกลุ่มสาขาวิจัยด้าน วิศวกรรมศาสตร์

ทั้งนี้ ในการพิจารณาจัดกลุ่มการนำเสนอเป็นแบบบรรยายหรือโปสเตอร์ นั้น มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จะแจ้งให้ท่านทราบโดยเร็วต่อไป และขอให้ท่านจัดทำต้นฉบับบทความเพื่อตีพิมพ์ในสื่อรวมบทความวิชาการ (Proceeding) ของการประชุมครั้งนี้ สำหรับเผยแพร่ในการประชุม และเพื่ออ้างอิงทางวิชาการ ซึ่งสามารถเลือกใช้ภาษาไทยหรือภาษาอังกฤษ โดยขอให้จัดส่งต้นฉบับภายในวันที่ 15 มิถุนายน 2545 รายละเอียดการจัดทำและการจัดส่งบทความ ปรากฏตามเอกสารสิ่งที่ส่งมาด้วย 1.

อนึ่ง หากท่านยังไม่ได้ลงทะเบียนหรือชำระค่าลงทะเบียนขอความกรุณาดำเนินการด้วย เพื่อให้การเตรียมการประชุมสามารถดำเนินการไปได้ด้วยความเรียบร้อยและทราบจำนวนผู้เข้าร่วมนำเสนอผลงานวิจัยที่แน่นอน รายละเอียดการลงทะเบียนแจ้งไว้แล้วในเอกสารสิ่งที่ส่งมาด้วย 2. หรือที่ Web Site : [http:// www.sut.ac.th/gradresearch3](http://www.sut.ac.th/gradresearch3)

จึงเรียนมาเพื่อทราบ และโปรดจัดทำต้นฉบับบทความเพื่อตีพิมพ์ ดังที่เรียนไว้ข้างต้นด้วย

ขอแสดงความนับถือ

(รองศาสตราจารย์ ดร. กัญฉะ สาคริก)

รองอธิการบดีฝ่ายวางแผน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประธานคณะกรรมการฝ่ายวิชาการ

การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาของประเทศไทย ครั้งที่ 3

คณะกรรมการฝ่ายวิชาการฯ
โทรศัพท์ (044) 224052-3, 224057
โทรสาร (044) 224050

111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000 โทรศัพท์ (044) 223000 โทรสาร (044) 224070

SURANAREE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

111 UNIVERSITY AVENUE, SUB DISTRICT SURANAREE, MUANG DISTRICT, NAKHON RATCHASIMA 30000, THAILAND Tel. (044) 223000 Fax. (044) 224070

ชื่อบทความ: การออกแบบและอนุวัตตัวควบคุมพีชชีเพื่อจัดการพลังงานในระบบพลังงานแสงอาทิตย์

ผู้แต่ง: เปร็จ เฝ้าละออ และ สรวุฒิ สุจิตจร

ผู้นำเสนอบทความ: เปร็จ เฝ้าละออ

สังกัด: สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

อีเมล: padej@ccs.sut.ac.th โทร: (044) 224400

กลุ่มวิชา: กลุ่มวิทยาศาสตร์-วิศวกรรมศาสตร์-เทคโนโลยี

การใช้งานระบบพลังงานแสงอาทิตย์มีความซับซ้อนสูง เนื่องจากองค์ประกอบต่างๆ ในระบบ อันประกอบด้วย แผงเซลล์แสงอาทิตย์ แบตเตอรี่ ตัวควบคุมตามรอยกำลังงานสูงสุด มอเตอร์ต่อควมปั้มน้ำ รวมทั้งความเข้มแสงอาทิตย์ ต่างก็มีลักษณะสมบัติที่ไม่เป็นเชิงเส้นอย่างมาก การดำเนินงานศึกษาให้เข้าใจถึงพลวัตทางด้านพลังงาน เพื่อใช้ในการออกแบบและอนุวัตตัวควบคุม เพื่อจัดการพลังงานในระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นเช่นนี้ คงต้องอาศัยการวิเคราะห์ผลจากการจำลองสถานการณ์ (simulation) บนรากฐานของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุปกรณ์ต่างๆ ที่ประกอบขึ้นเป็นระบบอย่างเหมาะสม ดังนั้นงานวิจัยนี้ จึงนำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของส่วนประกอบต่างๆ ในระบบพลังงานแสงอาทิตย์ พร้อมทั้งระบุค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ให้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้โดยตรง และทำการจำลองผลระบบด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อศึกษาและวิเคราะห์พลวัตทางด้านพลังงานของระบบ เพื่อบูรณาการไปสู่การออกแบบตัวควบคุมพีชชี ซึ่งมีโครงสร้างแบบฐานกฎ (rule-based) ที่พัฒนาขึ้นจากความรู้ด้านพฤติกรรมทางพลังงานของระบบ เพื่อนำไปกำกับสั่งการให้เกิดการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ให้ได้สูงสุด โดยตัวควบคุมจะมีหน้าที่เฝ้าตรวจสอบสถานะพลังงานทางด้านเอาต์พุตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ แล้วดำเนินการตัดสินใจสั่งการสวิทช์ถ่ายโอนพลังงานให้แก่อุปกรณ์ต่างๆ ในระบบอย่างเหมาะสม พร้อมทั้งดำเนินการทดสอบระบบเมื่อมีตัวควบคุมด้วยการจำลองสถานการณ์ และทำการวิเคราะห์ผลการทดสอบและเปรียบเทียบถึงข้อดีของพฤติกรรมทางด้านพลังงานของระบบเมื่อมีตัวควบคุม เพื่อเป็นการยืนยันให้เห็นถึงประโยชน์และประสิทธิผลของตัวควบคุมที่พัฒนาขึ้น เพื่อประโยชน์ในการประหยัดพลังงาน และได้ระบบพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูงเชิงการใช้พลังงาน

ประวัติผู้เขียน

นายเผด็จ เผ่าละออ เกิดเมื่อวันที่ 1 สิงหาคม พ.ศ.2519 เกิดที่อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ.2540 ภายหลังจากสำเร็จการศึกษาได้เข้าทำงานในตำแหน่งผู้ช่วยสอนและวิจัย สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เป็นเวลา 1 ปี ขณะกำลังศึกษาระดับปริญญาโทที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีได้รับทุนอุดหนุนวิจัยประจำปี 2543 ทางด้านการอนุรักษ์พลังงานจากทางมหาวิทยาลัย