



รายงานการวิจัย

ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงขนาด 1 กิโลวัตต์
ที่มีการใช้พลังงานอย่างเหมาะสมที่สุด จากแหล่งพลังงานสุริยะ

(An Optimized Drive for 1 kW DC Motor with
Solar Energy Source)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

รองศาสตราจารย์ ดร.สรารุณี สุจิตจร

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผู้ร่วมวิจัย

นายเผด็จ เผ่าละออ

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ.2543

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

ธันวาคม 2544

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ได้สนับสนุนทุนวิจัยสำหรับโครงการนี้ และขอขอบคุณ คุณชาย ชีวะเมศ ที่ได้กรุณาให้ข้อมูลการตรวจวัดความเข้มแสงอาทิตย์ตามพื้นที่ต่าง ๆ ในประเทศไทย

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อแสวงหาวิธีการจัดการพลังงานให้เหมาะสมที่สุด แก่ระบบพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีโหลดหลักเป็นมอเตอร์กระแสตรงพิกัด 2.5 แรงม้าขับปั๊ม ให้ทำงานได้ 24 ชั่วโมง การดำเนินงานจัดการพลังงานประกอบด้วย 3 ส่วน กล่าวคือ การลดทอนความสูญเสียในมอเตอร์ให้เหลือน้อยที่สุด การถ่ายโอนกำลังจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไปยังโหลดให้เกิดได้สูงสุด และการแสวงหาโอกาสใช้พลังงานไฟฟ้าที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตขึ้นให้ได้มากที่สุด ด้วยระบบดังกล่าวมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นอย่างมาก จึงต้องพึ่งพาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์ การจัดการพลังงานส่วนหนึ่งอาศัยตัวควบคุมแบบกำกับสั่งการ ที่พัฒนาขึ้นบนไมโครคอนโทรลเลอร์และภาษาไดนามิกซี การทดสอบระบบโดยรวมที่มีตัวควบคุมอาศัยการจำลองผลที่มีฮาร์ดแวร์ร่วมมอง ผลการศึกษาวิจัยพบว่า วิธีการออปติไมเซชันต่าง ๆ ให้ผลดี การใช้ระบบควบคุมแบบกำกับสั่งการให้ผลน่าพึงพอใจในระดับหนึ่ง แต่จะให้ผลดีกว่าถ้าระบบมีโหลดเป็นกลุ่มหลากหลายประเภท และมีการกระจายตัวของโหลดในลักษณะที่เอื้อต่อการจัดการพลังงานตามระยะเวลาเป็นช่วง ๆ ตลอดวัน

ABSTRACT

This research attempts to optimize energy utilization in a solar energy system. The system with a 2.5 hp dc motor coupled with a pump as its main load has to withstand a 24-hour operation. The optimization problem consists of 3 parts: loss minimization in the motor, maximization of the power transfer between the solar panels and the load, and maximum utilization of the solar energy. Since the system is highly nonlinear, accurate mathematical models and computer simulation are reliable state-of-the-art. Partly, the management of energy is achieved by the proposed supervisory controller. The controller is implemented on a microcontroller using Dynamic CTM. The test of the system including the controller employs hardware-in-loop simulation. It is found that the optimization approaches give good results while the supervisory controller offers satisfactory performance to a certain extent. Better performance of the controller is expected providing that the system contains multiple groups of various types of load, and the load must be properly time distributed in terms of energy utilization.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อ	ข
ABSTRACT	ค
สารบัญ	ง
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 กล่าวนำ	1
1.2 วัตถุประสงค์และเป้าหมายของการวิจัย	2
1.3 การจัดรูปเล่มของรายงานการวิจัย	3
บทที่ 2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ	
2.1 กล่าวนำ	4
2.2 แบบจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์	4
2.3 แบบจำลองแบตเตอรี่ตะกั่วกรด	11
2.4 แบบจำลองมอเตอร์กระแสตรงแบบกระตุ้นฟิวด์แยกส่วน	17
2.5 แบบจำลองของโหลดชนิดปั๊มหอยโข่ง	22
บทที่ 3 การจัดกำลังไฟฟ้าสูงสุดป้อนมอเตอร์	
3.1 กล่าวนำ	26
3.2 ลักษณะสมบัติของมอเตอร์กระแสตรงแบบกระตุ้นฟิวด์แยกส่วน ที่มีโหลดเป็นปั๊มหอยโข่ง	26
3.3 การถ่ายโอนพลังงานสูงสุดเมื่อพิจารณากำลังงานสูญเสียต่าง ๆ ของ มอเตอร์	32
3.4 สรุป	36
บทที่ 4 การอพติไมซ์พลังงานเมื่อใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์	
4.1 กล่าวนำ	37
4.2 หลักการทำงานของตัวควบคุมตามรอยกำลังงานสูงสุด (MPPT)	37
4.3 การอพติไมซ์พลังงานเมื่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งจ่ายแก่ มอเตอร์จับป้อนน้ำ	41

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4 การอพยพคีย์บอร์ดและเมาส์จากเครื่องคอมพิวเตอร์เป็นแหล่งจ่ายแก่ แปดเคอร์รี่	46
4.5 การอพยพคีย์บอร์ดและเมาส์จากเครื่องคอมพิวเตอร์เป็นแหล่งจ่ายแก่ มอเตอร์และแปดเคอร์รี่	51
4.6 อภิปรายและสรุปผล	53
บทที่ 5 การจำลองผลระบบ	
5.1 กล่าวนำ	55
5.2 ความเข้มแสงอาทิตย์	55
5.3 การจัดอุปกรณ์ในระบบ	57
5.4 โครงสร้างของโปรแกรมจำลองผลระบบพลังงานแสงอาทิตย์	63
บทที่ 6 การควบคุมแบบกำกับสั่งการเพื่อจัดการพลังงาน	
6.1 กล่าวนำ	69
6.2 ตัวควบคุมแบบกำกับสั่งการ	70
6.3 การศึกษาพลวัตทางพลังงานของระบบ	71
6.4 ฐานกฎเพื่อกำกับสั่งการจัดการพลังงาน	80
6.5 การทดสอบตัวควบคุมด้วยการจำลองผล	82
บทที่ 7 สรุปและข้อเสนอแนะ	
7.1 สรุป	86
7.2 ข้อเสนอแนะ	87
เอกสารอ้างอิง	88
ผนวก ก โปรแกรมตัวควบคุมแบบกำกับสั่งการ	91
ผนวก ข การเชื่อมต่อตัวควบคุมผ่านพอร์ตเครื่องพิมพ์ของ PC	101
ประวัตินักวิจัย	104

บทที่ 1

บทนำ

1.1 กล่าวนำ

พลังงานแสงอาทิตย์นับเป็นพลังงานทางเลือกหนึ่งที่สำคัญอย่างยิ่ง เพราะเป็นพลังงานสะอาดและมืออย่างเหลือเฟือในประเทศไทย แต่ว่าการใช้ประโยชน์ยังจำเป็นต้องพึ่งพาอุปกรณ์แปลงผันพลังงานที่เรียกว่า เซลล์แสงอาทิตย์ (solar cells) ซึ่งเมื่อนำอุปกรณ์นี้มาต่อรวมกันเป็นจำนวนมากเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ภาคสนามก็จะเรียกว่า แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (solar panels) หรือเรียกโดยย่อว่า แผงพีวี (PV panels : PV มาจาก photovoltaic) แผงเซลล์แสงอาทิตย์ทำการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์ไปเป็นพลังงานไฟฟ้าชนิดกระแสตรง เพื่อการใช้ประโยชน์กับอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ และเป็นที่ยอมรับกันว่าในปัจจุบันแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีราคาแพง มีลักษณะสมบัติที่ไม่เป็นเชิงเส้นขึ้นกับปริมาณความเข้มแสงอาทิตย์ (insolation) [1, 3, 6, 7] เมื่อใช้งานมีประสิทธิภาพการแปลงผันพลังงานไม่สูง [5, 24] ดังนั้น เพื่อให้การใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นไปอย่างคุ้มค่า งานวิศวกรรมที่จำเป็นจึงเกี่ยวกับการเลือกโหลด (load) อย่างเหมาะสมที่จะใช้กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ รวมถึงการลดการสูญเสียต่าง ๆ ในระบบให้เหลือน้อยที่สุด เพื่อให้ได้ระบบพลังงานแสงอาทิตย์ ที่มีประสิทธิภาพสูงสุดกับงานแต่ละประเภท [3, 15, 21, 25, 26]

แม้ว่าหลายประเทศทั้งในยุโรป อเมริกา และแอฟริกาใช้ระบบพลังงานแสงอาทิตย์เป็นแบบต่อโดยตรง กล่าวคือ ไม่มีแบตเตอรี่สำรองไฟฟ้า [27, 28] สำหรับประเทศไทยแล้วผู้วิจัยเชื่อว่าเราควรพัฒนาระบบให้เป็นเอกเทศ (stand-alone) ซึ่งจะต้องมีแบตเตอรี่สำรองไฟฟ้าจึงจะใช้ประโยชน์ได้กว้างขวางในการเป็นหน่วยผลิตพลังงานไฟฟ้าในชนบท สามารถใช้งานได้ตลอด 24 ชั่วโมง ไม่ว่าจะเป็นในไร่นา สถานีอนามัยที่ไฟฟ้ายังเข้าไม่ถึง หรือแม้กระทั่งรีสอร์ทท่ามกลางธรรมชาติที่ไม่ต้องการใช้ระบบจ่ายไฟฟ้าตามปกติเพื่ออนุรักษ์สภาพธรรมชาติ เมื่อต้องการใช้แบตเตอรี่สำรองไฟฟ้าเช่นนี้ ประเทศไทยและประเทศในเขตร้อนอื่น ๆ นับว่าโชคดีที่สภาพภูมิอากาศเอื้ออำนวยให้แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด (lead-acid batteries) หรือแบตเตอรี่รถยนต์ทำงานได้ดี [29] ซึ่งแบตเตอรี่ชนิดนี้ราคาถูก ทนทาน ผลิตในประเทศและบำรุงรักษาง่าย หากเป็นประเทศในเขตอบอุ่นคงไม่สามารถหลีกเลี่ยงที่จะต้องใช้แบตเตอรี่ที่ออกแบบมาโดยเฉพาะสำหรับใช้กับระบบพลังงานแสงอาทิตย์ในเขตอบอุ่น [25] ซึ่งเป็นอุปกรณ์เทคโนโลยีล้ำสมัยที่ราคาสูงมาก ระบบพลังงานแสงอาทิตย์ที่สนใจตามโครงการวิจัยและพัฒนานี้ จึงมีแหล่งกำเนิด

พลังงานหลักเป็นแผงเซลล์แสงอาทิตย์ มีแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดเป็นแหล่งกำเนิดพลังงานรอง และได้พิจารณาให้มีโหลดเป็นดีซีมอเตอร์คู่ควบกับปั้มน้ำ (ปั้มน้อยโง่) เพราะเป็นรูปแบบของโหลดส่วนมากที่พบทางเกษตรกรรมและกสิกรรม

1.2 วัตถุประสงค์และเป้าหมายของการวิจัย

โครงการวิจัยและพัฒนาระบบพลังงานแสงอาทิตย์นี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อการอนุรักษ์พลังงานด้วยการพึ่งพาตนเองทางเทคโนโลยี ที่จะนำไปสู่การตัดวงใช้ประโยชน์พลังงานแสงอาทิตย์ให้ได้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ เพื่อการใช้ระบบพลังงานแสงอาทิตย์อย่างคุ้มค่า เนื่องจากระบบพลังงานแสงอาทิตย์มีองค์ประกอบที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง การดำเนินงานศึกษาให้เข้าใจพฤติกรรมทางด้านพลังงานของระบบ จึงต้องพึ่งพาการจำลองผล (simulation) บนรากฐานของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสม เมื่อศึกษาได้เข้าใจพฤติกรรมอันไม่เป็นเชิงเส้นของระบบอย่างดีแล้ว ก็จะนำไปสู่การออกแบบและอนุวัตตัวควบคุมกำกับสั่งการ (supervisory controller) เพื่อกำกับสั่งการให้เกิดการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ให้ได้มากในช่วงเวลาใดเวลาหนึ่งเท่าที่อาจจะทำได้ ตัวควบคุมกำกับสั่งการที่จะพัฒนาขึ้นมีโครงสร้างแบบฐานกฎ (rule-based) ที่ต้องเลือกโครงสร้างของตัวควบคุมลักษณะนี้เพราะ การเลือกให้เกิดการถ่ายโอนพลังงานจากแหล่งกำเนิดไปยังโหลดต้องพึ่งพาตรรกในการตัดสินใจ และด้วยความไม่เป็นเชิงเส้นและความแปรปรวนของความเข้มแสงอาทิตย์ที่ไม่อาจคาดเดาได้ การใช้การควบคุมแบบฐานกฎที่พัฒนาขึ้นมาจากความรู้อันพฤติกรรมทางพลังงานของระบบจึงเป็นแนวทางที่เหมาะสม ดังนั้น อาจกล่าวได้ว่าโครงการวิจัยนี้มีเป้าหมายของการดำเนินงานเป็นลำดับดังต่อไปนี้

- ศึกษาค้นคว้าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขององค์ประกอบต่าง ๆ ของระบบพลังงานแสงอาทิตย์ ได้แก่ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ แบตเตอรี่ ดีซีมอเตอร์ ปั้มน้อยโง่ และกลไกการถ่ายโอนกำลังจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไปยังโหลด
- กำหนดทางลดการสูญเสียในมอเตอร์ขณะขับเคลื่อนให้เหลือน้อยที่สุด
- พัฒนาโปรแกรมจำลองผลด้วย MATLAB™
- ศึกษาพฤติกรรมด้านพลังงานของระบบด้วยการจำลองผล
- ดำเนินการออกแบบและอนุวัตตัวควบคุมกำกับสั่งการเพื่อการออกพืไม่ซ์พลังงาน (ซึ่งคำว่าออกพืไม่ซ์ในที่นี้หมายถึง ความพยายามแสวงประโยชน์จากพลังงานที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้ได้มากที่สุดภายใต้สภาวะความไม่เป็นเชิงเส้นทั้งหมด และการดำเนินงาน

มิได้จำกัดว่าจะต้องอาศัยเทคนิคทางคณิตศาสตร์ประยุกต์ด้านการหาค่าเหมาะที่สุด อาจเป็นเทคนิคอื่นที่พึงพาการจำลองผลก็ได้)

- ทดสอบระบบที่มีตัวควบคุมกำกับสั่งการด้วยการจำลองผล เพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรม ด้านพลังงานของระบบก่อนและหลังมีตัวควบคุม เป็นการแสดงให้เห็นประโยชน์และประสิทธิผลของตัวควบคุมที่พัฒนาขึ้น

1.3 การจัดรูปแบบของรายงานการวิจัย

รายงานการวิจัยนี้ประกอบด้วย 7 บท นอกจากบทที่ 1 ซึ่งเป็นบทนำแล้ว บทอื่นๆมีเนื้อหา ดังต่อไปนี้

บทที่ 2 มีเนื้อหาว่าด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ อันประกอบด้วย ส่วนหลัก ๆ คือ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ แบตเตอรี่ มอเตอร์ และปั้มน้ำ (ปั้มน้อยโข่ง)

บทที่ 3 อธิบายถึงแนวทางการจัดกำลังไฟฟ้าสูงสุดป้อนมอเตอร์ ด้วยวิธีลดการสูญเสียในมอเตอร์ให้เหลือน้อยที่สุด (loss minimization)

บทที่ 4 มีเนื้อหาที่ว่าด้วยการออกแบบใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยอาศัยตัวควบคุมตามรอยกำลังงานสูงสุด (MPPT controller) และหม้อแปลงคิซี (DC-DC Transformer) และมีรายละเอียดการวิเคราะห์หาอัตราส่วนการแปลงที่เหมาะสมที่สุดสำหรับหม้อแปลงคิซี เมื่อบางขณะแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีโหลดเป็นมอเตอร์และปั้มน้ำ ในบางขณะก็มีแบตเตอรี่เป็นโหลดร่วม

บทที่ 5 กล่าวถึงการประมาณความเข้มแสงอาทิตย์ การจัดอุปกรณ์ในระบบพลังงานแสงอาทิตย์ ที่พิจารณาว่ามีความต้องการให้ระบบทำงานได้ 24 ชั่วโมง และแต่ละวันมีแสงอาทิตย์ที่จะใช้ประโยชน์ได้ยาวนานที่สุด 5 ชั่วโมง ซึ่งถือว่าเป็นกรณีเลวร้ายที่สุด (worst-case consideration) และกล่าวถึงโครงสร้างของโปรแกรมจำลองผล

บทที่ 6 อธิบายถึงการจำลองผลระบบในขั้นต้น เพื่อศึกษาพฤติกรรมด้านพลังงาน นำพาไปสู่การออกแบบตัวควบคุมกำกับสั่งการ หลังจากที่ได้อธิบายถึงการออกแบบและสร้างตัวควบคุมกำกับสั่งการแล้ว ก็จะเป็นการกล่าวถึงการศึกษาเปรียบเทียบเพื่อแสดงให้เห็นประสิทธิผลของการมีตัวควบคุมดังกล่าวในระบบ

บทที่ 7 เป็นบทสรุปและข้อเสนอแนะ

บทที่ 2

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ

2.1 กล่าวนำ

ปัญหาด้านการใช้พลังงานอย่างเหมาะสมที่สุด ซึ่งต่อไปนี้จะขอเรียกว่าการอพติไมเซชันของพลังงาน จำเป็นต้องพึ่งพาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เที่ยงตรง ของส่วนประกอบต่างๆในระบบที่เป็นความสนใจของเรา ซึ่งมักพบบ่อยครั้งว่าส่วนประกอบต่างๆมีลักษณะสมบัติที่ไม่เป็นเชิงเส้น โครงการวิจัยนี้สนใจการใช้พลังงานในระบบผสมผสาน ที่มีการใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์และแบตเตอรี่เป็นทางเลือก ระบบพลังงานใดๆย่อมประกอบด้วยสองส่วนหลักได้แก่ แหล่งจ่ายและโหลด แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่จะต้องนำมาใช้ประโยชน์ จึงมีดังต่อไปนี้

ส่วนที่เป็นแหล่งจ่าย

- แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (photovoltaic array หรือ PV array)
- แบตเตอรี่ (battery)

ส่วนที่เป็นโหลด

- มอเตอร์กระแสตรง (dc motor)
- ปั๊มน้ำ

เนื้อหาของบทที่สองจึงเป็นการกล่าวถึง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่างๆข้างต้นตามลำดับ

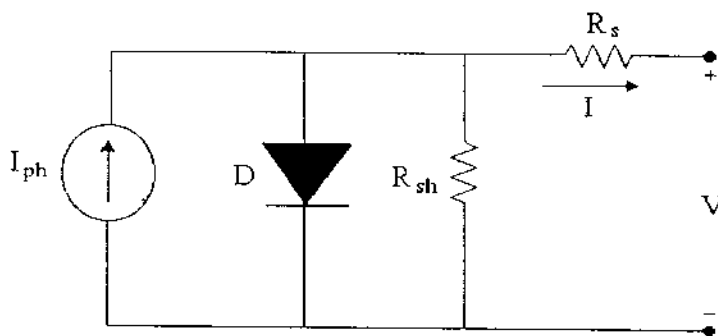
2.2 แบบจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์

แหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่สำคัญอย่างหนึ่ง ตามบริบทของงานวิจัยนี้คือ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งตามความเป็นจริงประกอบสร้างมาจากเซลล์แสงอาทิตย์ (solar cells) จำนวนมหาศาล หากทราบหลักการและลักษณะสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละเซลล์ เมื่อยอมรับในข้อสมมุติที่ว่าเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละเซลล์มีลักษณะสมบัติที่เหมือนกันทุกประการ จึงอาจพิจารณาได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นการประกอบกันของแบบจำลองทาง

คณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์หลายๆเซลล์ที่ต่ออนุกรมและขนานกัน มีผู้ค้นคิดแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์อยู่บ้าง [1-8] ในจำนวนนี้แทบทั้งหมดเป็นแบบจำลองพารามตริก (parametric models) ที่มีแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็น \ln ฟังก์ชันของกระแสต่างๆที่เกี่ยวข้อง จะมีก็แต่เพียง [6] ที่เสนอรายละเอียดการคำนวณ ที่พิจารณาแบบจำลองภายในแผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นโครงข่ายหลายเมช (multi-mesh network) และ [7] ที่นำเสนอทั้งแบบจำลองพารามตริกและแบบจำลองอินเทอร์โพลชัน (interpolation model) แบบจำลองอย่างหลังมีประโยชน์ต่อกรณีที่ไม่ทราบค่าพารามิเตอร์ใดๆของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ แต่มีแผงเซลล์แสงอาทิตย์จริงๆอยู่ ทำให้สามารถทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์นั้น หากำแรงดันและกระแสที่จุดพิกัดสำคัญๆต่างๆ สำหรับประกอบขึ้นเป็นแบบจำลองอินเทอร์โพลชันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์นั้นได้

เนื่องจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีรูปลักษณะที่คล้ายกัน จะต่างกันก็ตรงที่รายละเอียดปลีกย่อยทางพารามิเตอร์ภายในแบบจำลอง และที่มาของพารามิเตอร์เหล่านั้น การเลือกแบบจำลองที่เหมาะสมมาใช้งานจึงยึดหลักต่อไปนี้

- เป็นแบบจำลองที่ง่ายต่อการคำนวณ
- ให้ความแม่นยำเพียงพอภายในขอบเขตการใช้งาน
- เป็นชนิดพารามตริกเพราะไม่มีโอกาสได้ทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จริง
- จะต้องพบแหล่งข้อมูลค่าพารามิเตอร์



รูปที่ 2.1 วงจรสมมูลของ เซลล์แสงอาทิตย์

จากการพิจารณาเนื้อหารายละเอียดของเอกสาร[1-8]พบว่า แบบจำลองที่เสนอไว้ใน[5]เป็นสิ่งที่ควรเลือกใช้ ในขณะที่ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จริง ซึ่งผลิตโดยSiemens อาจหาได้จาก[8] ต่อจากนี้ไปเป็นการอธิบายรายละเอียดของแบบจำลอง

วงจรมูลของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งเซลล์มีลักษณะดังแผนภาพในรูปที่2.1 R_{sh} เป็นความต้านทานขนานรอยต่อ p-n ตามปกติจะมีขนาดใหญ่มาก เมื่อเทียบกับความต้านทานในเนื้อสารกึ่งตัวนำ และจุดเชื่อมต่อ (R_s) จึงอาจถือได้ว่าตรง R_{sh} เป็นการเปิดวงจร ขณะที่ R_s เป็นการลัดวงจร ความสัมพันธ์ของกระแสเซลล์แสงอาทิตย์ I และแรงดัน V มีดังสมการต่อไปนี้ [5]

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

เมื่อ I_{ph} คือ กระแสโฟโต(ขึ้นกับปริมาณแสงและอุณหภูมิ)

I_{rs} คือ กระแสอิ่มตัวย้อนกลับ(ขึ้นกับอุณหภูมิ)

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 อุณหภูมิของเซลล์หน่วยเป็น K

ข้อมูลที่ใช้ในการจำลองผลแผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นของซีเมนส์ SP-75W โมดูลหนึ่งประกอบด้วยเซลล์ทั้งหมด 36 เซลล์ที่ต่ออนุกรมกัน โดยมีค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้

- ความเข้มแสง(100% Insolation) 1000 W/m^2
- กำลังไฟฟ้าพิกัด 75 W
- กระแสพิกัด 4.4 A
- แรงดันพิกัด 14 – 17 V

- $I_{ph} = 4.8 \text{ A}$
- แรงดันขณะเปิดวงจร 21.7 V

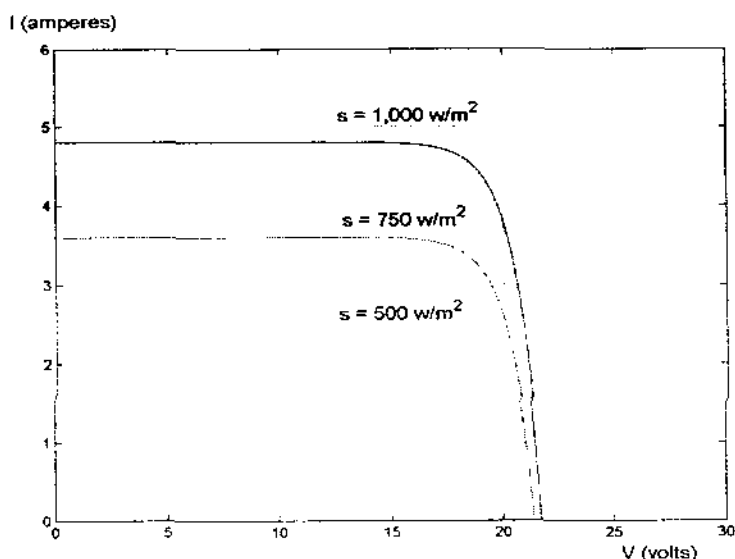
จากข้อมูลของผู้ผลิตดังกล่าว ค่าคงที่ T และ A ก่อให้เกิดค่า $q/(kTA)$ คงที่เท่ากับ 32.42 [8] ในกรณีหนึ่งโมดูลจะมี $n_p = 1$ และ $n_s = 36$

นอกจากนี้ ค่ากระแสอิ่มตัวย้อนกลับ(I_{rs}) สามารถคำนวณได้โดยทราบแรงดันขณะเปิดวงจร ซึ่งที่จุดนี้ค่ากระแสเอาต์พุตเป็นศูนย์ ดังนั้นจากสมการที่ (2-1) ทำให้สามารถคำนวณค่า I_{rs} ได้ดังนี้

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

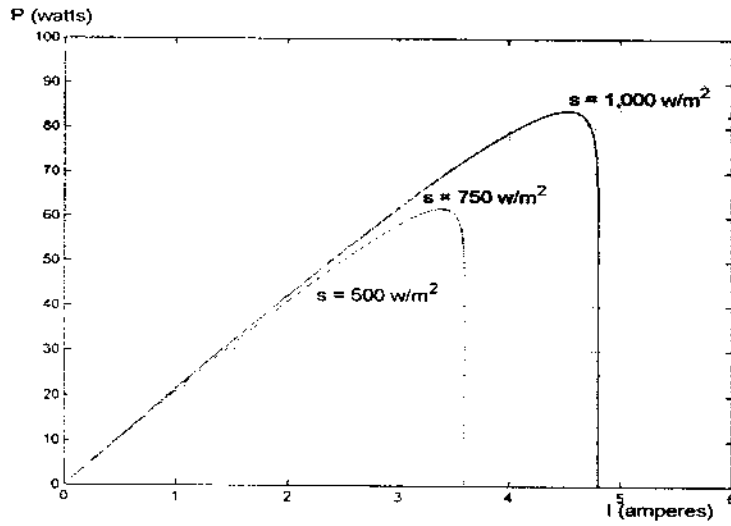
จึงได้ค่า $I_{rs} = 1.5619E-8 \text{ A}$ (ค่า I_{rs} จะไม่เปลี่ยนแปลงในกรณีที่นำโมดูลมาอนุกรมกัน เนื่องจากอัตราการเปลี่ยนแปลงของ V_{oc} เป็นสัดส่วนกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของ n_s พอดี และค่า I_{rs} จะไม่เปลี่ยนแปลงในกรณีที่นำโมดูลมาขนานกัน เนื่องจากในสมการที่ (2-2) ไม่มี n_p เข้ามาเกี่ยวข้อง) นอกจากนั้นกำลังไฟฟ้า (P) ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ อาจคำนวณได้จาก IV โดยอาศัยสมการที่ (2-1) ได้ดังนี้

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

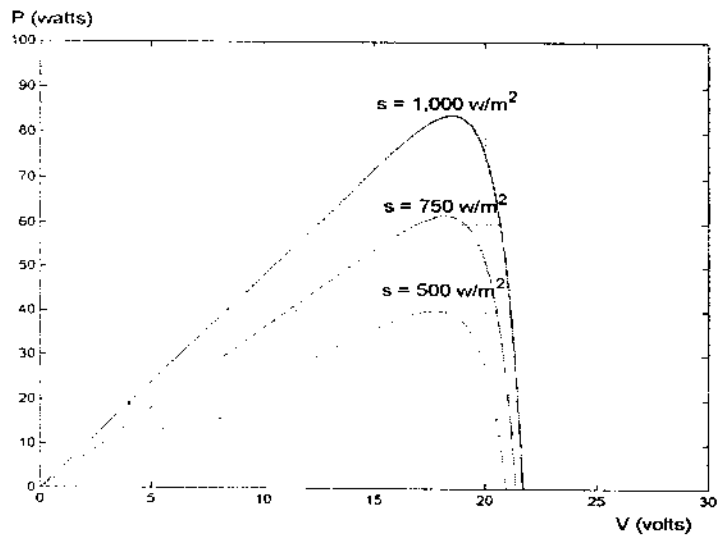


รูปที่ 2.2 ลักษณะสมบัติของ I และ V ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

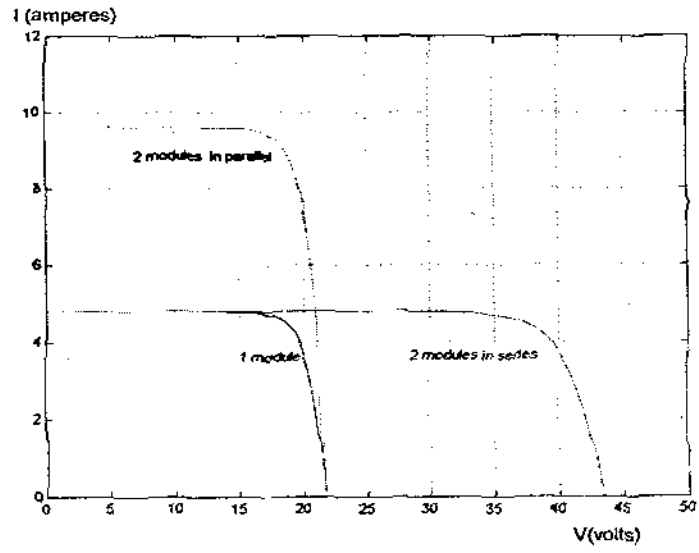
เมื่อปริมาณความเข้มแสง (S) เปลี่ยนแปลง จะทำให้ค่าของ I_{ph} ผันแปรตามเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่า S แต่ I_{sc} จะคงที่เนื่องจากอุณหภูมิของตัวเซลล์ถือว่าค่อนข้างคงที่ เพื่อแสดงลักษณะสมบัติของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผันแปรไปตามปริมาณความเข้มแสง จึงกำหนดให้ค่า S เป็น 750 w/m^2 และ 500 w/m^2 เพิ่มเติมจากที่ 100% ความเข้มแสง จึงทำให้ I_{ph} มีค่า 3.6 A และ 2.4 A ตามลำดับ จากค่าที่กำหนดต่างๆ เหล่านี้ เมื่อนำไปคำนวณตามแบบจำลอง (2-1) และ (2-2) จะได้ลักษณะสมบัติที่แสดงได้ด้วยกราฟดังรูปที่ 2.2 2.3 และ 2.4 จากข้อมูลที่ใช้ในการจำลองผลจะเห็นว่า แผงเซลล์แสงอาทิตย์เพียงแค่โมดูลเดียวจะไม่เพียงพอต่อการใช้งาน การนำโมดูลมาต่ออนุกรมกันจะช่วยในการเพิ่มแรงดัน และถ้าต้องการให้กระแสเพิ่มขึ้นจะต้องนำโมดูลมาต่อขนานกัน อาจทำความเข้าใจได้จากตัวอย่างดังนี้ กำหนดความเข้มแสง (S) เท่ากับ $1,000 \text{ w/m}^2$ และแยกการพิจารณาออกเป็น โมดูลเดี่ยวโดดๆ อนุกรมสองโมดูล ($n_p = 1, n_s = 72$) และขนานสองโมดูล ($n_p = 2, n_s = 36$) ลักษณะสมบัติของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งต่อกันเป็นโมดูล อาจแสดงได้ดังกราฟในรูปที่ 2.5 2.6 และ 2.7 ตามลำดับ



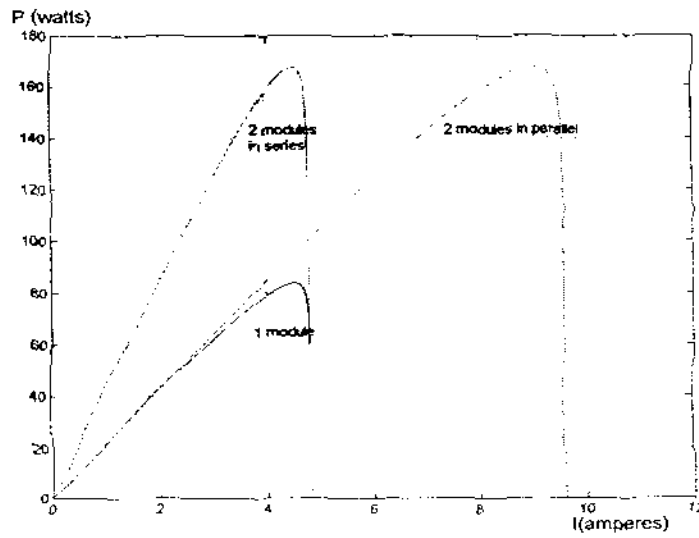
รูปที่ 2.3 ลักษณะสมบัติของ P และ I ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 2.4 ลักษณะสมบัติของ P และ V ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์



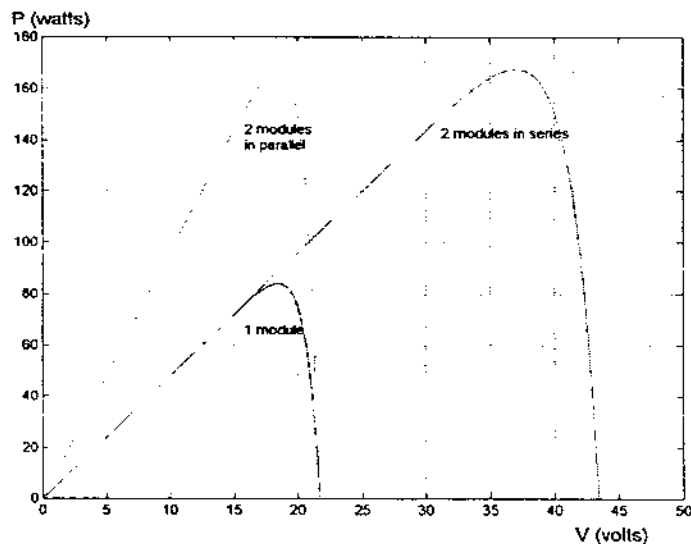
รูปที่ 2.5 ลักษณะสมบัติของ I และ V ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์
ต่อเป็นโมดูล



รูปที่ 2.6 ลักษณะสมบัติของ P และ I ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์
ต่อเป็นโมดูล

2.3 แบบจำลองแบตเตอรี่ตะกั่วกรด

แบตเตอรี่ตะกั่วกรด (lead-acid battery) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้งานกันอย่างกว้างขวาง มีความคงทนน่าเชื่อถือสูง ข้อเสียหลักๆของแบตเตอรี่ชนิดนี้คงจะอยู่ที่ความไม่เป็นเชิงเส้นในลักษณะสมบัติของมัน และในขณะที่ใช้จะมีโอกรกระเหยออกมาอยู่ตลอดเวลา การใช้งานแบตเตอรี่ตะกั่วกรดในชีวิตประจำวัน ไม่มีอะไรซับซ้อนให้ต้องคำนึงถึงมากนัก แต่เมื่อนำแบตเตอรี่ชนิดนี้มาใช้งานกับระบบพลังงานที่มีแผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นส่วนหนึ่งของระบบ เนื่องจากส่วนประกอบแต่ละส่วนมีราคาสูงมาก การใช้งานส่วนประกอบทุกส่วนอย่างคุ้มค่าที่สุดจึงเป็นวัตถุประสงค์



รูปที่ 2.7 ลักษณะสมบัติของ P และ V ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ต่อเป็น โมดูล

ประสงค์ทางวิศวกรรม ดังนั้นการที่จะต้องยุ่งเกี่ยวกับความไม่เป็นเชิงเส้นของแบตเตอรี่จึงเป็นสิ่งที่ไม่อาจหลีกเลี่ยงได้

การใช้งานอย่างคุ้มค่าที่สุดในบริบทของงานวิจัยนี้ หมายถึงการใช้ระบบพลังงานโดยให้มีการจัดการพลังงานอย่างเหมาะสมที่สุด ซึ่งในงานวิศวกรรมจำเป็นต้องพึ่งพาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับแบตเตอรี่ได้มีผู้คิดค้นและเผยแพร่ความรู้ด้านแบบจำลองไว้จำนวนหนึ่ง อาจแบ่งได้เป็นสองกลุ่มใหญ่ๆกล่าวคือ แบบจำลองที่เน้นรายละเอียดของพลวัตทางเคมีไฟฟ้า เช่น [9] และกลุ่มแบบจำลองที่มุ่งประเด็นไปที่ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าเป็นหลัก [10-12]

เนื่องจากงานวิจัยนี้เน้นความสมจริงทางการใช้ประโยชน์พลังงานไฟฟ้า แบบจำลองของกลุ่มหลังจึงเข้าประเด็นความเหมาะสมที่จะใช้กับงานวิจัย

วัฏจักรการทำงานของแบตเตอรี่อาจแบ่งออกเป็น 5 ช่วง [10] ได้แก่

- 1) ช่วงคายประจุด้วยกระแสคงที่ (constant current discharge หรือ CCD)
- 2) ช่วงอยู่นิ่งในสถานะคายประจุ (discharge idle time หรือ DIT)
- 3) ช่วงชาร์จด้วยกระแสคงที่ (constant current charge หรือ CCC)
- 4) ช่วงชาร์จขณะแรงดันคงที่ (constant voltage charge หรือ CVC) และ
- 5) ช่วงอยู่นิ่งในสถานะชาร์จ (charge idle time หรือ CIT)

ทุกวัฏจักรยังคงประกอบด้วยพลวัตของสถานะชั่วคราวและสถานะคงตัว ตามครรลองปกติของระบบพลวัต ทว่าสถานะชั่วคราวนั้นกินเวลาสั้นมากจนแทบจะไม่มีผลต่อการศึกษาด้านพลังงานของระบบ เพราะฉะนั้นงานวิจัยนี้จึงพิจารณาวัฏจักรสถานะคงตัว 2 ช่วงคือ CCD และ CCC ซึ่งใน 2 ช่วงนี้กระแสแบตเตอรี่จะคงที่ เนื่องจากแบตเตอรี่ตะกั่วกรดเป็นเซลล์ทุติยภูมิ (secondary cell) มีลักษณะสมบัติไม่เป็นเชิงเส้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความต้านทานภายใน อัตราการชาร์จและคายประจุ สถานะของการชาร์จ (state of charge หรือ SOC) อายุการใช้งาน ประสิทธิภาพ ฯ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแบตเตอรี่ขณะคายประจุ [11] จึงเป็นดังสมการ (2-4)

$$V_b = V_0 - (R_{int} \cdot I) - \left[K1 \cdot \frac{I^n}{C} \right] \cdot t - \left[\frac{K2}{C - I^n \cdot t} \right] \quad (2-4)$$

- ซึ่ง
- V_b คือ แรงดันที่ขั้วของแบตเตอรี่ขณะคายประจุ
 - V_0 คือ แรงดันเริ่มต้นของแบตเตอรี่
 - R_{int} คือ ค่าความต้านทานภายในรวม สมมติให้มีค่าคงที่ไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และสถานะของการชาร์จ (SOC) (หมายเหตุ: ที่สถานะการชาร์จและคายประจุจะมีค่าแตกต่างกัน)
 - I คือ ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลในแบตเตอรี่ขณะคายประจุ
 - C คือ ค่าความจุของแบตเตอรี่ (battery capacity : Ah)
 - t คือ เวลาที่ใช้ในการคายประจุแบตเตอรี่ (h)
 - n คือ Peukert's exponent (ไม่มีหน่วย) โดยปกติจะให้มีค่าระหว่าง 1.05-2

(ถ้า n มีค่าเท่ากับ 1 และความจุของแบตเตอรี่เท่ากับ 70 Ah หมายถึงจะ
 คิซซาร์จได้เต็มที่ 70 ชั่วโมง ที่อัตราการคิซซาร์จ 1 A)

K1 คือ ค่าสัมประสิทธิ์จาก Peukert's equation

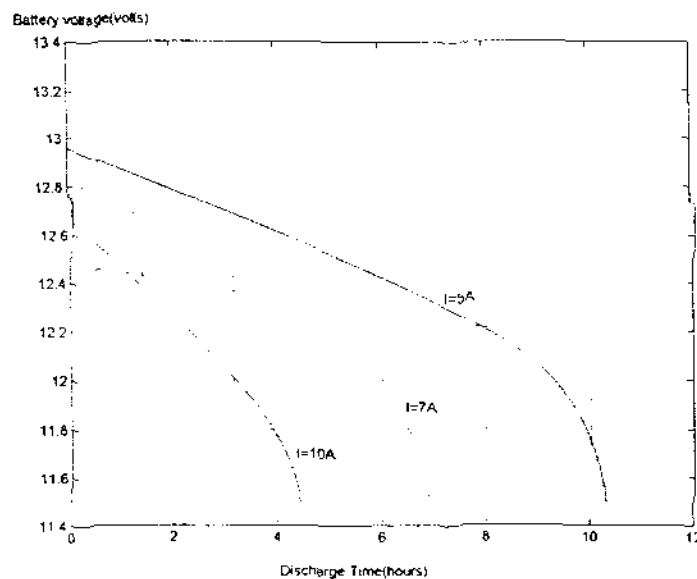
K2 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ทำให้แรงดันตกกระทันหันเมื่อแบตเตอรี่คิซซาร์จใกล้

หมด

พารามิเตอร์ในแบบจำลองของแบตเตอรี่ขณะคิซซาร์จนั้น มาจากการทดสอบแบตเตอรี่
 ตะกั่วกรดผลิตโดย CELTIC [12] ซึ่งมี

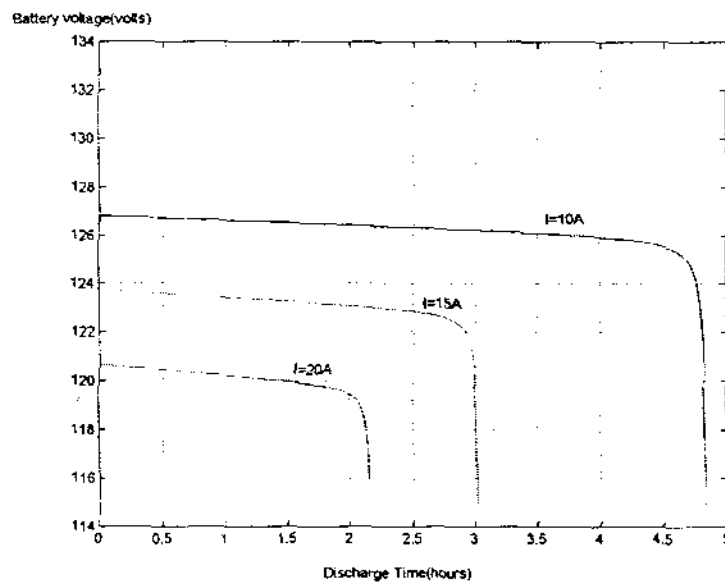
- แรงดันปกติ (nominal) 12V
- ค่าความจุพิักัด 70Ah
- ค่าความต้านทานภายในรวม (R_{tot}) ขณะคิซซาร์จเท่ากับ $6.15 \times 10^{-2} \Omega$
- ค่า K1 เท่ากับ 0.9
- K2 เท่ากับ 2.2 และ
- n เท่ากับ 1.16

เมื่อพิจารณาที่อัตราการคิซซาร์จ (rate of discharge : I) ที่กระแสคังที่ 5, 7 และ 10A โดย
 ได้คำนวณทดสอบตามค่าแรงดันที่สภาวะคิซซาร์จ คังนี้ แรงดันสูงสุด (fully charged : SOC
 100%) ที่ 13.3V และแรงดันต่ำสุด (totally empty : SOC 0%) ที่ 11.5V % SOC นี้จะเปลี่ยน
 แปลงตามค่าช่วงแรงดัน ซึ่งถูกจำกัดโดยผู้ใช้ตามสภาพเงื่อนไขการทำงานของแบตเตอรี่



รูปที่ 2.8 ลักษณะสมบัติการคิซซาร์จของแบตเตอรี่

เมื่อคำนวณตามสมการ(2-4)โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆดังที่ระบุไว้ข้างต้น ลักษณะสมบัติการคิซซาร์จของแบตเตอรี่จะเป็นดังรูปที่ 2.8 จากรูปกราฟจะเห็นว่าขณะเริ่มคิซซาร์จแรงดันที่ขั้วแบตเตอรี่จะตกลงอย่างรวดเร็วจากแรงดันสูงสุด (fully charged) ซึ่งมีสาเหตุจากค่าความต้านทานภายในรวมของแบตเตอรี่ จากนั้นแรงดันจะตกอย่างราบเรียบแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล ซึ่งเกิดจากค่าความจุของแบตเตอรี่และค่าความต้านทานภายในรวม และจะเห็นว่าอัตราการคิซซาร์จ (ระดับกระแส I) ถ้ามีค่าสูงขึ้นจะทำให้เวลาในการคิซซาร์จสั้นลง หรืออาจกล่าวได้ว่า จำนวนชั่วโมงใช้งานของแบตเตอรี่จะสั้นถ้าให้จ่ายกระแสสูงๆ



รูปที่ 2.9 ลักษณะสมบัติการคิซซาร์จของแบตเตอรี่เป็น โมดูลจากการต่ออนุกรมกัน 10 ลูก

ในกรณีที่ต้องการให้แรงดันที่ขั้วของแบตเตอรี่มีค่าสูงขึ้น จะต้องนำแบตเตอรี่มาอนุกรมกัน โดยสมมุติว่าแบตเตอรี่ทุกตัวมีคุณลักษณะเหมือนกันทุกประการ ซึ่งถ้านำแบตเตอรี่ตัวที่กล่าวข้างต้นมาอนุกรมกันเข้า 10 ตัว จะได้แรงดันปกติกลายเป็น 120V ค่าความจุพิกัด 70Ah ค่าความต้านทานภายในรวมขณะคิซซาร์จเป็น $10 \times 6.15 \times 10^{-2} \Omega$ เมื่อพิจารณาที่อัตราการคิซซาร์จด้วยกระแสคงที่ 10, 15 และ 20A ค่าช่วงแรงดันที่สภาวะการคิซซาร์จจะกลายเป็น แรงดันสูงสุด (fully charged : SOC 100%) ที่ 133V และแรงดันต่ำสุด (totally empty : SOC 0%) ที่ 115V เมื่อคำนวณหาเองเดียวกันกับข้างต้น ก็จะได้กราฟลักษณะสมบัติดังรูปที่ 2.9

กระบวนการชาร์จของแบตเตอรี่ อาจอธิบายได้ด้วยสมการเดียวกันกับขณะที่ดิสชาร์จ [12] เพียงแต่คำนึงถึงเครื่องหมายของกระแสและค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆให้ถูกต้อง ดังนั้นสมการที่(2-5)จึงเป็นสมการแรงดันของแบตเตอรี่ขณะชาร์จ

$$V_b = V_0 + (R_{tot} \cdot I) + \left[K1 \cdot \frac{I^n}{C} \right] \cdot t + \left[\frac{K2}{C - I^n \cdot t} \right] \quad (2-5)$$

- ซึ่ง
- V_b คือ แรงดันที่ขั้วของแบตเตอรี่ขณะชาร์จ
 - V_0 คือ แรงดันเริ่มต้นของแบตเตอรี่
 - R_{tot} คือ ค่าความต้านทานภายในรวม
 - I คือ ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลในแบตเตอรี่ขณะชาร์จ
 - C คือ ค่าความจุของแบตเตอรี่ (battery capacity: Ah)
 - t คือ เวลาที่ใช้ในการชาร์จแบตเตอรี่ (h)
 - n คือ Peukert's exponent
 - $K1$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์จาก Peukert's equation
 - $K2$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ทำให้แรงดันเพิ่มขึ้นกระทันหันเมื่อแบตเตอรี่ชาร์จใกล้เต็ม

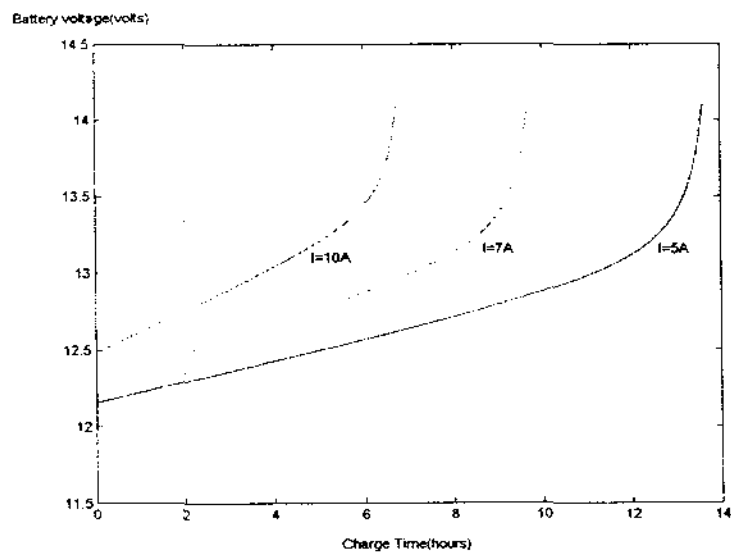
จากข้อมูลทางเทคนิคของแบตเตอรี่CELTIC ตัวเดิมที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ค่าความต้านทานภายในรวม (R_{tot}) ขณะชาร์จเป็น $6.56 \text{ E-}2 \ \Omega$ และค่า n เป็น 1 (หมายเหตุ: $n=1$ เป็นค่าที่สมจริงเพราะหาก $n < 1$ ผลการคำนวณตามสมการ (2-5) จะแสดงจำนวนชั่วโมงของการชาร์จที่นานเกินความเป็นจริง หาก $n > 1$ จำนวนชั่วโมงของการชาร์จก็จะสั้นเกินกว่าเหตุ ทั้งนี้เป็นการชาร์จภายใต้กระแสต่อเนื่อง) เร่งพิจารณาอัตราการชาร์จ (rate of charge : I) ที่กระแสคงที่ 5, 7 และ 10A โดยสอดคล้องกับช่วงแรงดันที่สภาวะชาร์จ ดังนี้

แรงดันต่ำสุด (totally empty : SOC 0%) ที่ 11.8V และแรงดันสูงสุด (fully charged : SOC 100%) ที่ 14.1V

จะสังเกตเห็นว่าช่วงแรงดันที่สภาวะการชาร์จและการดิสชาร์จจะไม่ต่อเนื่องกัน(สภาวะการดิสชาร์จมีแรงดันสูงสุดที่ 13.3 V และแรงดันต่ำสุดที่ 11.5 V) โดยแรงดันต่ำสุดที่สภาวะการชาร์จจะมีค่าสูงกว่าแรงดันต่ำสุดที่สภาวะการดิสชาร์จ ทั้งนี้เป็นเพราะในช่วงระยะเวลาสั้น ๆ

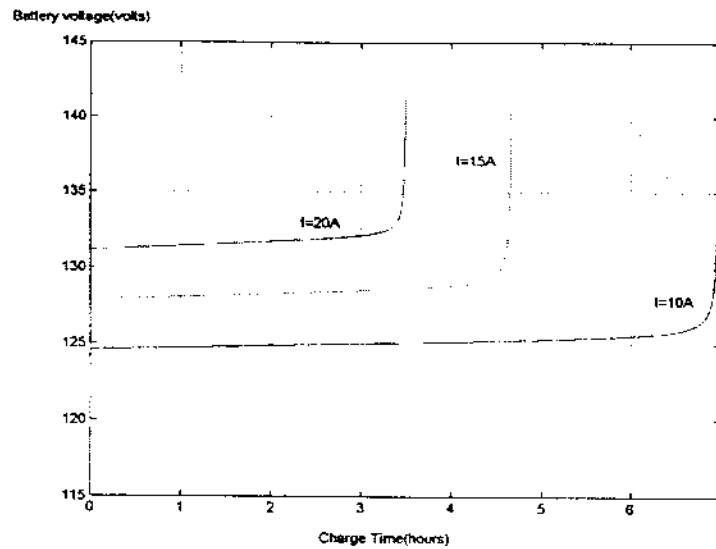
ขณะที่แบตเตอรี่จะเปลี่ยนจากสถานะคิสชาร์จมาเป็นชาร์จนั้น แรงดันจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจาก 11.5 V เป็น 11.8 V ซึ่งที่สถานะชั่วคราวนี้เราเรียกว่าช่วง discharge idle time: DIT คั้งที่ได้กล่าวมาแล้วในตอนต้น

ในทำนองเดียวกันแรงดันสูงสุดที่สถานะชาร์จ จะมีค่าสูงกว่าแรงดันสูงสุดที่สถานะคิสชาร์จ ทั้งนี้เพราะในช่วงระยะเวลาสั้นๆขณะที่แบตเตอรี่จะเปลี่ยนจากสถานะชาร์จมาเป็นคิสชาร์จนั้น แรงดันจะลดลงอย่างรวดเร็วจาก 14.1V เป็น 13.3 V ซึ่งที่สถานะชั่วคราวนี้เราเรียกว่าช่วง charge idle time: CIT ช่วง DIT และ CIT เป็นช่วงเวลาที่รวดเร็วมาก จึงสมมติให้มีช่วงเวลาดังกล่าวเป็นศูนย์ [12]



รูปที่ 2.10 ลักษณะสมบัติการชาร์จของแบตเตอรี่

เมื่อนำค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่กล่าวมาแล้วแทนลงในสมการที่ (2-5) และทำการคำนวณ จะได้ความสัมพันธ์ของแรงดันที่ขั้วของแบตเตอรี่ขณะชาร์จ (V_c) เทียบกับเวลา(ช.ม.) แสดงเป็นกราฟดังรูปที่ 2.10 จากกราฟจะเห็นว่า ขณะเริ่มชาร์จแรงดันที่ขั้วของแบตเตอรี่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจากแรงดันต่ำสุด (totally empty) ซึ่งมีสาเหตุจากค่าความต้านทานภายในรวมของแบตเตอรี่ จากนั้นแรงดันจะเพิ่มอย่างราบเรียบแบบ ซึ่งเกิดจากค่าความจุของแบตเตอรี่และค่าความต้านทานภายในรวม และจะเห็นว่าอัตราการชาร์จ(I) ถ้ามีค่าสูงขึ้นจะทำให้เวลาในการชาร์จสั้นลง



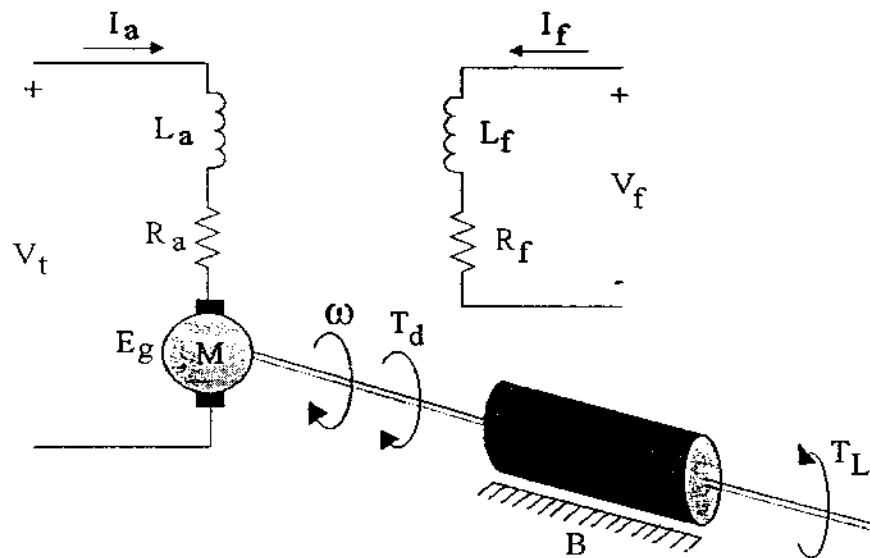
รูปที่ 2.11 ลักษณะสมบัติการชาร์จของแบตเตอรี่เป็นโมดูล
จากการต่ออนุกรมกัน 10 ลูก

กรณีที่น่าแบตเตอรี่มาอนุกรมกันเข้า 10 ตัว จะทำให้ค่าความต้านทานภายในรวมขณะชาร์จ กลายเป็น $10 \times 6.56 \text{ E-}2 \Omega$ เมื่อพิจารณาอัตราการชาร์จที่กระแสคงที่ 10, 15 และ 20A โดยค่าช่วงแรงดันที่สถานะการชาร์จเป็น แรงดันต่ำสุด (totally empty : SOC 0%) ที่ 118V และแรงดันสูงสุด (fully charged : SOC 100%) ที่ 141V ผลการคำนวณที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ขั้วของแบตเตอรี่ขณะชาร์จ (V_p) กับเวลาที่ใช้ในการชาร์จ(ช.ม.) จึงแสดงได้ดังกราฟตามรูปที่ 2.11

2.4 แบบจำลองมอเตอร์กระแสตรงแบบกระตุ้นฟิลด์แยกส่วน

มอเตอร์ที่นำมาพิจารณาใช้ในระบบของงานวิจัยนี้ เป็นชนิดกระแสตรงกระตุ้นฟิลด์แยกส่วน เพราะได้มีการใช้งานมอเตอร์ประเภทนี้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่างๆ และได้พบว่าใช้งานได้ดีกว่ามอเตอร์กระแสตรงชนิดอื่นๆ อีกทั้งมีความอ่อนตัวสูงในการควบคุม

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เป็นที่คุ้นเคยกันเป็นอย่างดี ทั้งในรูปฟังก์ชันถ่ายโอน (transfer function) และสมการสถานะ (state equation) งานวิจัยนี้ใช้แบบจำลองของรูปสมการสถานะ [13] เพื่อให้ง่ายต่อการจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์ มอเตอร์แบบกระตุ้นฟิวด์แยก



รูปที่ 2.12 แผนภาพของมอเตอร์ชนิดกระตุ้นฟิวด์แยกส่วน

ส่วนมีแผนภาพดังรูปที่ 2.12 ความหมายของอักษรต่างๆที่ปรากฏในภาพมีดังต่อไปนี้

V_t คือ แรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์ทางด้านอาร์เมเจอร์

V_f คือ แรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์ทางด้านฟิวด์

E_g คือ แรงดันย้อนกลับของมอเตอร์

I_a คือ กระแสอาร์เมเจอร์

I_f คือ กระแสฟิวด์

L_a คือ ความเหนี่ยวนำทางด้านอาร์เมเจอร์

L_f คือ ความเหนี่ยวนำทางด้านฟิวด์

R_a คือ ความต้านทานขดลวดอาร์เมเจอร์

R_f คือ ความต้านทานขดลวดฟิวด์

ω คือ ความเร็วเชิงมุม (rad/sec)

J คือ โมเมนต์เฉื่อยของมอเตอร์ (Kg.m^2)

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

T_d คือ แรงบิดที่มอเตอร์สร้างขึ้น

T_L คือ แรงบิดจากโหลด

k_b คือ ค่าคงที่ทางความเร็วของมอเตอร์

k_t คือ ค่าคงที่ทางแรงบิดของมอเตอร์

การควบคุมความเร็วของมอเตอร์ในช่วงฟิลด์เต็มพิกัด(full field) สามารถกระทำได้โดยการปรับแปรแรงดันทางด้านวงจรรีเมเจอร์ วิธีนี้นิยมใช้สำหรับควบคุมความเร็วในช่วงที่ต่ำกว่าความเร็วฐานของมอเตอร์ในช่วงฟิลด์เต็มพิกัด(full-field base speed) เราอาจสร้างความสัมพันธ์ของแรงดันทางด้านอาร์เมเจอร์ได้ดังสมการ (2-6) และ (2-7)

$$V_t = R_a I_a + L_a \frac{dI_a}{dt} + E_s \quad (2-6)$$

ซึ่งก็คือ

$$V_t = R_a I_a + L_a \frac{dI_a}{dt} + k_b \omega \quad (2-7)$$

ความสัมพันธ์ทางแรงบิดที่มอเตอร์สร้างขึ้น อาจเขียนแสดงได้ดังสมการ (2-8)

$$T_d = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega + T_L \quad (2-8)$$

โดยที่ $T_d = k_t I_a$ ดังนั้น

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

เราอาจจัดรูปสมการ (2-7) และ (2-9) ใหม่จะได้ว่า

$$\frac{dI_a}{dt} = -\frac{R_a}{L_a} I_a - \frac{k_b}{L_a} \omega + \frac{1}{L_a} V_t$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{k_t}{J} I_a - \frac{B}{J} \omega - \frac{1}{J} T_L$$

หรืออาจเขียนแสดงสมการทั้งสองข้างต้น ให้อยู่ในรูปสมการสถานะได้ดัง (2-10)

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

ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของมอเตอร์ที่ใช้ มีดังต่อไปนี้ [14]

ขนาดพิกัด 110 V, 20 A, 2.5 hp (1865 W), 1800 rpm (188.49 rad/sec), 9.89 N-m

$$R_a = 0.6 \Omega$$

$$L_a = 8 \text{ mH}$$

$$J = 0.0465 \text{ kg-m}^2$$

$$B = 0.004 \text{ N-m.sec/rad}$$

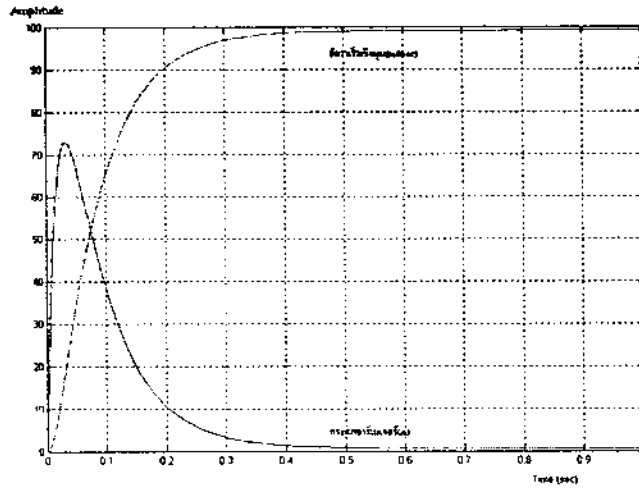
$$k_t (\text{N-m/A}) = k_b (\text{V/rad/sec}) = 0.55$$

เมื่อแทนค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ลงในสมการที่ (2-10) จะได้ผลดังสมการที่ (2-11)

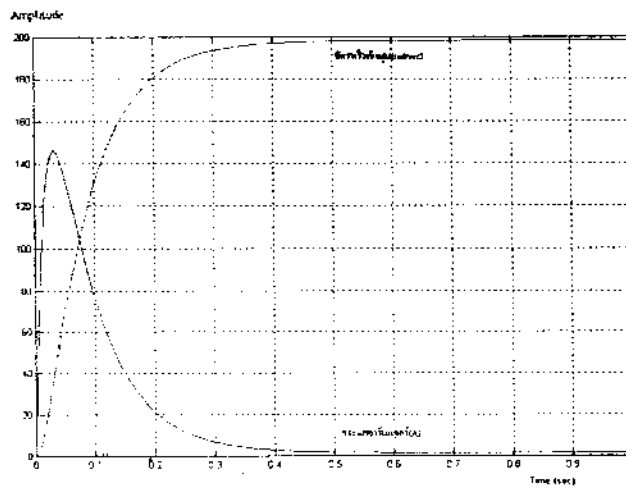
$$\begin{bmatrix} \frac{dI_a}{dt} \\ \frac{d\omega}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -75 & -68.75 \\ 11.827957 & -0.086022 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 125 & 0 \\ 0 & -21.505376 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_t \\ T_L \end{bmatrix} \quad (2-11)$$

การคำนวณตามแบบจำลอง (2-11) อาจทำได้ไม่ยากโดยใช้ฟังก์ชัน ode23 ของ MATLAB หากค่า I_a และ ω เทียบกับเวลา โดยป้อนแรงดัน $V_t = 55 \text{ V}$ และมอเตอร์ทำงานในสภาวะไร้โหลด $T_L = 0$ ซึ่งกำหนดให้ที่เวลา $t = 0$, I_a และ $\omega = 0$ จะได้ผลการคำนวณดังรูปที่ 2.13(ก) ซึ่งสามารถเปรียบเทียบเพื่อตรวจสอบความถูกต้องได้กับ [14] จากรูปอาจสังเกตเห็นว่า I_a และ ω เข้าสู่สภาวะคงตัวที่ประมาณ 0.72 A และ 99.21 rad/sec ตามลำดับ เมื่อลองทำการป้อนแรงดันที่ค่าพิกัด $V_t = 110 \text{ V}$ และมอเตอร์ทำงานในสภาวะไร้โหลด $T_L = 0$ ซึ่งกำหนดให้ที่เวลา $t = 0$,

I_r และ $\omega = 0$ เช่นกัน จะได้ผลการคำนวณดังรูปที่ 2.13(ข) ซึ่งในคราวนี้ I_r และ ω เข้าสู่สถานะคงตัวที่ประมาณ 1.44 A และ 198.43 rad/sec ตามลำดับ



(ก)



(ข)

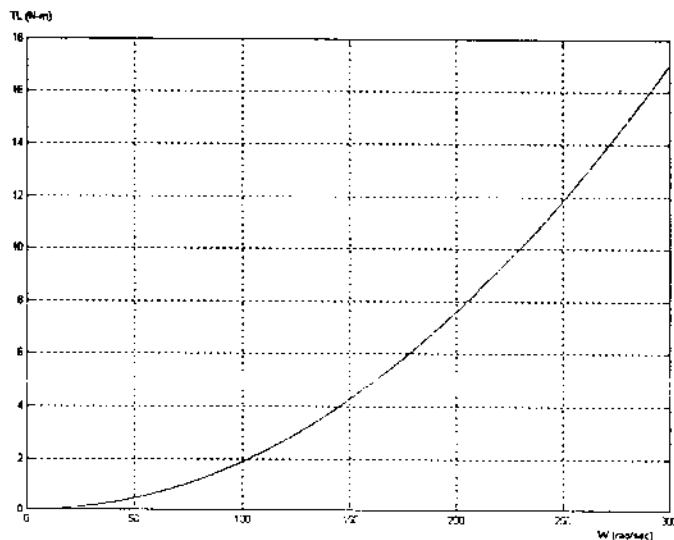
รูปที่ 2.13 ลักษณะสมบัติการทำงานทางธรรมชาติของมอเตอร์

(ก) ที่แรงดันป้อนครึ่งอัตราพิกัด

(ข) ที่แรงดันป้อนเต็มพิกัด

2.5 แบบจำลองของโหลดชนิดปั๊มหอยโข่ง

ความประสงค์หนึ่งของงานวิจัยนี้คือ การพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อสังคมไทยเป็นหลักใหญ่ เมื่อเป็นดังนี้ การเลือกโหลดที่สมจริงจึงคำนึงถึงการใช้ประโยชน์ระบบ ที่อาจเกิดขึ้นได้บ่อยๆ ทั้งในเขตที่อยู่อาศัย เขตเกษตรกรรมกสิกรรม รวมไปถึงจนถึงแหล่งท่องเที่ยว ซึ่งจะพบว่าโหลดที่ใช้มากนั้นเป็น ปั๊มหอยโข่ง (centrifugal pump) และยังเป็นโหลดที่ใช้มากที่สุดชนิดหนึ่งกับระบบพลังงานแสงอาทิตย์ ไม่ว่าจะในประเทศตะวันตกหรือในแถบแอฟริกา (ผู้อ่านที่สนใจอาจค้นคว้าเพิ่มเติมได้ จากหนังสือคู่มือทางด้านพลังงานทางเลือก และรายงานด้านพลังงานทางเลือกขององค์การสหประชาชาติ) อย่างไรก็ตามคงจะต้องขยายความให้ชัดเจนว่า โหลดในขณะนี้หมายถึงภาระของมอเตอร์โดยตรง (หมายเหตุ ในช่วงระยะเวลาหนึ่งของระบบรวม แบตเตอรี่และมอเตอร์กับปั๊มอาจเป็นโหลดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และแบตเตอรี่อาจมีโหลดเป็นมอเตอร์กับปั๊มได้)



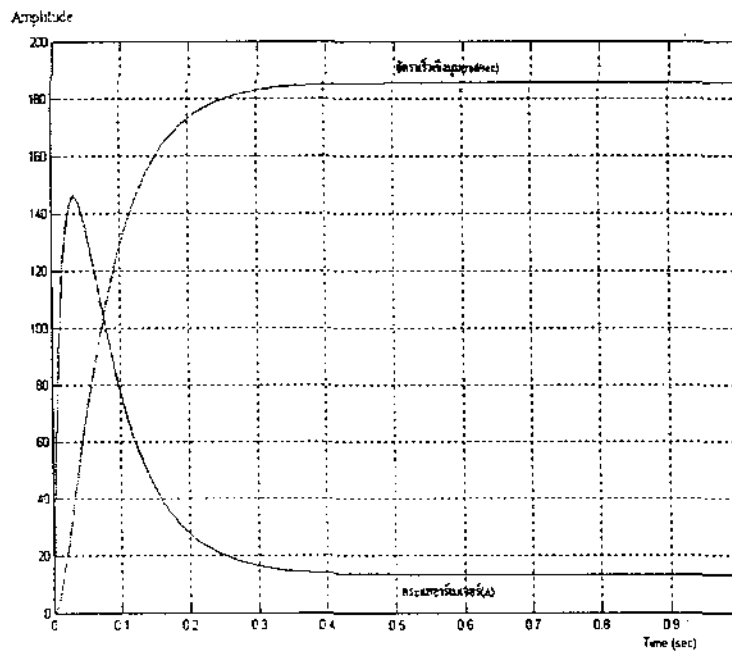
รูปที่ 2.14 ลักษณะสมบัติของปั๊มหอยโข่ง

ปั๊มหอยโข่ง เป็นเครื่องสูบบางแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่ใช้กำลังเหวี่ยงออกจากศูนย์กลาง ดันน้ำขึ้นไป มีราคาถูก ประสิทธิภาพสูง (ประสิทธิภาพจะยิ่งสูงที่ความเร็วพิกัด) และง่ายในการติดตั้ง ปั๊มหอยโข่งเป็นโหลดเชิงกลที่มีลักษณะสมบัติเป็นพาราโบลิก (parabolic load) แรงบิดของปั๊มหอยโข่ง (T_L) จะขึ้นอยู่กับอัตราเร็วของมอเตอร์ (ω) ยกกำลังสอง นั่นคือ

$$T_L = k \omega^2 \quad (2-12)$$

ซึ่ง k ($\text{N}\cdot\text{m}/(\text{rad}/\text{sec})^2$) เป็นค่าคงที่ของโหลด มีค่าเท่ากับ $1.898 \cdot 10^4$ [15] รูปที่ 2.14 แสดงแรงบิดของโหลดเทียบกับอัตราเร็ว

เรามีความจำเป็นต้องทราบว่า เมื่อต่อโหลดนี้เข้ากับมอเตอร์จะเกิดผลอย่างไรบ้าง ดังนั้นสมการ(2-12) ของโหลดจึงถูกนำไปแทนค่าลงในสมการ (2-11) ของมอเตอร์ แล้วใช้ฟังก์ชัน ode23 ของ MATLAB หาค่า I_a และ ω เทียบกับเวลา กำหนดให้ป้อนแรงดันมอเตอร์ที่พิกัด $V_t = 110 \text{ V}$ และ ณ เวลา $t = 0$, I_a และ $\omega = 0$ จะได้ลักษณะสมบัติการทำงานของมอเตอร์เมื่อมีโหลด ดังรูปที่ 2.15

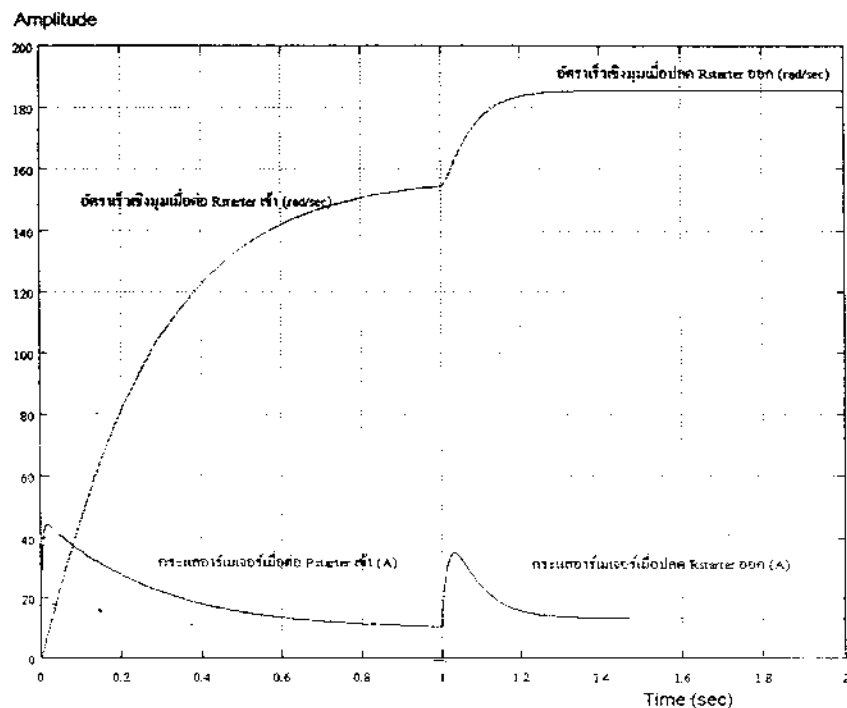


รูปที่ 2.15 กระแสอาร์เมเจอร์และอัตราเร็วของมอเตอร์เมื่อขับโหลด

จากรูปที่ 2.15 อาจสังเกตเห็นว่า กระแสอาร์เมเจอร์เพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในขณะที่เริ่มเดินเครื่อง โดยมีค่ากระแสสูงสุดที่ประมาณ 146.49 A ต่อจากนั้นกระแสอาร์เมเจอร์จะลดลงอย่างรวดเร็วและเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ประมาณ 13.25 A ส่วนอัตราเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ประมาณ 185.56 rad/sec อัตราเร็วเชิงมุมที่สภาวะคงตัวเมื่อมีโหลดนี้ จะมีค่าใกล้เคียงกับในกรณีที่ไม่มีโหลด (198.43 rad/sec) ซึ่งเป็นลักษณะสมบัติของมอเตอร์กระแสตรงแบบกระตุ้นฟิวด์แยกส่วน เนื่องจากโหลดที่เป็นปัมพ์หอยโข่งประสิทธิภาพจะยิ่งสูงที่ความเร็วพิกัด ดังนั้นจึงเหมาะสมมากที่จะใช้มอเตอร์กระแสตรงแบบกระตุ้นฟิวด์แยก

ส่วน ในการจับโพลต์ที่เป็นปี่มหายโข่ง เพราะอัตราเร็วขณะที่มีโพลต์จะมีค่าใกล้เคียงกับความเร็วพิคค์(188.49 rad/sec) ของมอเตอร์

นอกจากนั้นจะยังสังเกตเห็นได้ว่า กระแสอาร์เมเจอร์เมื่อเริ่มเดินเครื่องจะมีขนาดสูงกว่า กระแสที่ค่าพิคค์ (20A) ถึง 7 เท่า กระแสสูงๆเช่นนี้จะมีผลต่อการทำงานของแหล่งจ่ายที่จ่ายให้แก่มอเตอร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้แบตเตอรี่เป็นแหล่งจ่าย การดึงกระแสสูงๆในทันทีจะทำให้แบตเตอรี่คิซาร์จนหมดสภาพในระยะเวลาอันสั้น คั้งนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องลดค่ากระแสอาร์เมเจอร์ในช่วงเริ่มเดินเครื่องให้ลดลง เทคนิคขั้นๆที่สุดประการหนึ่งในการลดกระแสเริ่มเดินเครื่อง เป็นการนำความต้านทาน $R_{starter}$ ที่มีเรียกว่า “ความต้านทานขณะเริ่มเดินเครื่อง” มาต่ออนุกรมเข้ากับมอเตอร์เพื่อช่วยจำกัดกระแสดังกล่าว ซึ่งจะต้องเลือกค่าความต้านทานที่เหมาะสม โดยคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงของกระแสอาร์เมเจอร์และอัตราเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ควบคู่กันไป อย่างไรก็ตาม วิธีการนี้มีข้อด้อยในด้านกำลังงานสูญเสียในตัวความต้านทาน $R_{starter}$



รูปที่ 2.16 ลักษณะสมบัติการสตาร์ทมอเตอร์เมื่อใช้ $R_{starter}$ ช่วยลดกระแสกระชากเมื่อเริ่มสตาร์ท

โดยอาศัยการคำนวณด้วยโปรแกรมสุ่มเลือกค่าความต้านทานขณะเริ่มเดินเครื่องที่เหมาะสม พบว่า $R_{starter}$ ที่เหมาะสมนั้นมีค่าประมาณ 3 เท่า ของค่าความต้านทานของตัวมอเตอร์

($R_{\text{starter}} = 3R_s ; R_s = 0.6 \Omega$) ดังนั้นขณะเริ่มเดินเครื่องจึงมีค่าความต้านทานรวมทั้งหมด $0.6+1.8 = 2.4 \Omega$ เพื่อที่จะลดค่ากำลังงานสูญเสียที่นำ R_{starter} มาต่ออนุกรม เมื่อเดินเครื่องไปแล้วประมาณ 1 วินาที ก็ควรที่จะปลด R_{starter} ออก เพื่อให้เหลือแต่ความต้านทานของตัวมอเตอร์อย่างเดียวนั่น

ลักษณะสมบัติทางกระแสแอมเพอร์และอัตราเร็วของมอเตอร์ เมื่อเริ่มเดินเครื่องโดยมีความต้านทาน R_{starter} ต่ออนุกรมร่วมกับตัวมอเตอร์ เป็นดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.16 จากรูปจะเห็นว่ากระแสแอมเพอร์ขณะเริ่มเดินเครื่อง มีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วโดยมีค่าสูงสุดที่ประมาณ 44.30 A เท่านั้น ซึ่งน้อยกว่าก่อนหน้าที่มีการใช้ R_{starter} มาก และขณะที่จะปลด R_{starter} ออก กระแสแอมเพอร์มีค่าเข้าสู่ภาวะคงตัวที่ประมาณ 10.43 A เมื่อปลด R_{starter} ออกที่เวลา 1 วินาที จะส่งผลให้กระแสแอมเพอร์มีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็วอีกครั้งหนึ่ง โดยมีค่าสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 35.20 A และเข้าสู่ภาวะคงตัวเท่าเดิมกับในสถานะที่ไม่มี R_{starter} เข้ามาเกี่ยวข้องซึ่งก็คือ 13.25 A

ส่วนอัตราเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ขณะเริ่มเดินเครื่อง ก็จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยขณะที่จะปลด R_{starter} ออก อัตราเร็วเชิงมุมมีค่าเข้าสู่ภาวะคงตัวที่ประมาณ 154.53 rad/sec เมื่อปลด R_{starter} ออกที่เวลา 1 วินาที ส่งผลให้อัตราเร็วเชิงมุมเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วอีกครั้ง และเข้าสู่ภาวะคงตัวเท่าเดิมกับในสถานะที่ไม่มี R_{starter} เข้ามาเกี่ยวข้องซึ่งก็คือ 185.56 rad/sec หากเปรียบเทียบก่อนและหลังการใช้ R_{starter} พบว่า R_{starter} สามารถช่วยลดขนาดของกระแสชากลงได้ 3.3 เท่า แต่อัตราเร็วต้องใช้เวลา 1.4 วินาทีจึงจะเข้าสู่ระดับ 185.56 rad/sec ตามต้องการได้ หากไม่ใช้ R_{starter} มอเตอร์ต้องการเวลาเพียง 0.5 วินาทีเท่านั้น เพื่อเข้าสู่สถานะคงตัวที่ต้องการ อย่างไรก็ตาม เวลาในการเริ่มเดินเครื่อง 1.4 วินาที คงไม่เป็นปัญหา อุปสรรคประการใดต่อการนำระบบพลังงานนี้

บทที่ 3

การจัดกำลังไฟฟ้าสูงสุดป้อนมอเตอร์

3.1 กล่าวนำ

มอเตอร์กระแสตรงและป้อนหอยโข่งเป็นโหลดหลัก สำหรับการให้ประโยชน์ระบบพลังงานแสงอาทิตย์ตามงานวิจัยนี้ การขับเคลื่อนทางไฟฟ้าที่นำมาใช้งานเป็นลักษณะของการควบคุมแรงดันด้านอาร์เมเจอร์ ที่ความเข้มสนามคงที่เต็มพิกัด (full-field) แหล่งจ่ายอาจเป็นแบตเตอรี่หรือแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ปัญหาทางพลังงานที่สำคัญก็คือ เราจะป้อนพลังงานแก่โหลดอย่างประหยัดที่สุดได้อย่างไร

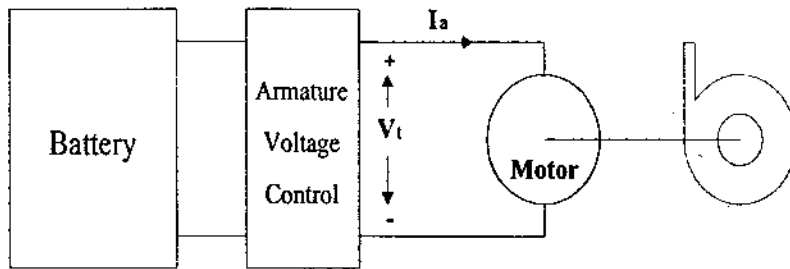
เมื่อพิจารณาแผนภาพในรูปที่ 3.1 จะเห็นว่าปัญหาการป้อนพลังงานอยู่ที่การหาปริมาณ V_t และ I_a อย่างเหมาะสมที่สุด หากเราสามารถหาปริมาณดังกล่าวได้ในทางทฤษฎี ในทางปฏิบัติเราอาจใช้คอนเวอร์เตอร์(converters)ในรูปแบบที่เหมาะสมใดๆ เป็นเครื่องดำเนินการให้บรรลุเป้าหมายได้ ในรูปที่ 3.1 (ก)และ (ข) ได้ใช้บล็อก "armature voltage control" ในความหมายแทนคอนเวอร์เตอร์ดังกล่าว ส่วนรายละเอียดที่เกี่ยวกับการจะใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ให้ได้อย่างคุ้มค่าและต้องการส่วนประกอบอะไรบ้างนั้น จะยังไม่กล่าวถึงในบทนี้

บทที่ 3 นี้จึงอธิบายถึงการออกแบบไมซ์พลังงานที่ป้อนแก่มอเตอร์และป้อน ตามแนวคิดของการลดการสูญเสียในมอเตอร์ให้ได้มากที่สุด(loss minimization) เนื้อหาในบทจึงเป็นการสร้างความเข้าใจเกี่ยวกับ การทำงานของมอเตอร์และป้อนควบกัน กับการวินิจฉัยการป้อนพลังงานอย่างเหมาะสมที่สุดแก่ชุดอุปกรณ์ดังกล่าว

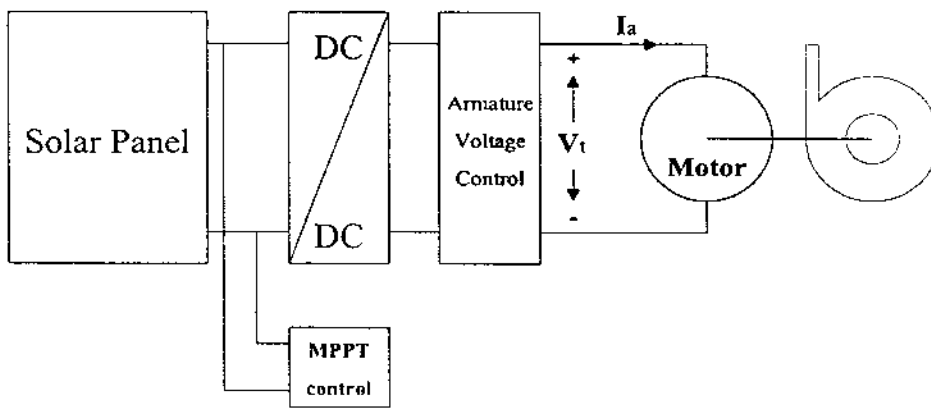
3.2 ลักษณะสมบัติของมอเตอร์กระแสตรงแบบกระตุ้นฟลักซ์แยกส่วนที่มีโหลดเป็นป้อนหอยโข่ง

บทที่ 2 ที่ผ่านมามีการนำเสนอรายละเอียดแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของมอเตอร์กระแสตรงแบบกระตุ้นฟลักซ์แยกส่วน สมการที่(2-7)แสดงความสัมพันธ์ทางด้านอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ และนำมาแสดงไว้ในที่นี้เป็นสมการ(3-1)

$$V_t = R_a I_a + L_a \frac{dI_a}{dt} + k_b \omega \quad (3-1)$$



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.1 แผนภาพระบบขับเคลื่อนกระแสตรงเมื่อมีแหล่งจ่าย (ก) แบตเตอรี่ (ข) แผงเซลล์แสงอาทิตย์

ในสถานะคงตัวจะลดรูปสมการได้เป็น

$$V_t = R_a I_a + k_b \omega \quad (3-2)$$

และจากสมการ(2-8) แรงบิดที่มอเตอร์สร้างขึ้น(developed torque: T_d) หาได้จาก

$$i_a = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega + T_L \quad \text{เมื่อ } T_d = k_t I_a = k_b I_a \text{ (} k_t = k_b \text{) จะได้}$$

$$k_b I_a = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega + T_L \quad (3-3)$$

และในสภาวะคงตัวสมการของแรงบิดจะเป็นดังนี้

$$k_b I_a = B\omega + T_L \quad (3-4)$$

ขณะที่ T_L เป็นแรงบิดของโหลดของมอเตอร์ ซึ่งในที่นี้คือปั๊ม มีแรงบิด $T_L = k \omega^2$ ซึ่ง k คือค่าคงที่ของปั๊ม

จากสมการ (3-4) และลักษณะสมบัติทางแรงบิดของปั๊มที่เป็นพาราโบลา เราอาจวิเคราะห์ความสัมพันธ์ดังกล่าวร่วมกัน เพื่อหาค่า ω จะได้

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

เนื่องจากค่า ω จะต้องมีค่าเป็นบวก จึงได้

$$\omega = \frac{-B/k + \sqrt{(B/k)^2 + (4k_b I_a / k)}}{2} \quad (3-5)$$

การหาแรงดันป้อนมอเตอร์สำหรับขับปั๊มให้มีความเร็ว ω ในสภาวะคงตัว อาจทำได้โดยนำสมการที่ (3-5) แทนค่าลงในสมการ (3-2) แล้วหา V_t จะได้

$$V_t = R_a I_a + k_b \left[\frac{-B/k + \sqrt{(B/k)^2 + (4k_b I_a / k)}}{2} \right] \quad (3-6)$$

ตามลักษณะสมบัติของมอเตอร์และปั๊มที่ใช้งาน มีค่าคงที่ต่างๆดังต่อไปนี้

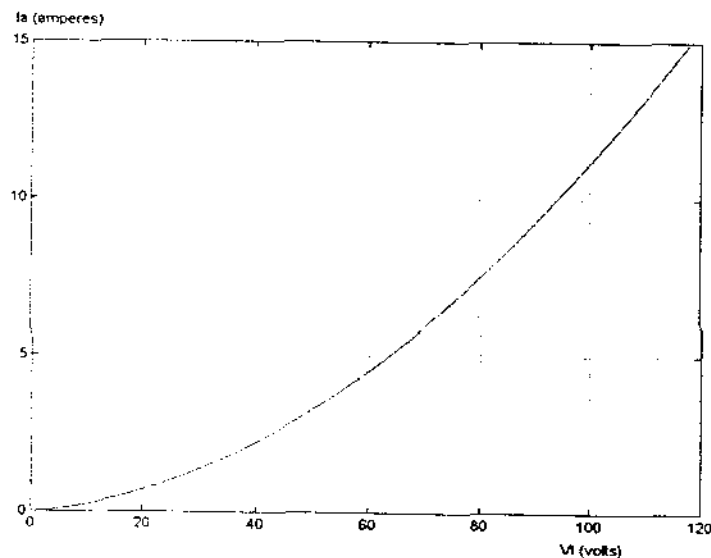
$$R_a = 0.6 \Omega$$

$$B = 0.004 \text{ N-m.sec/rad}$$

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

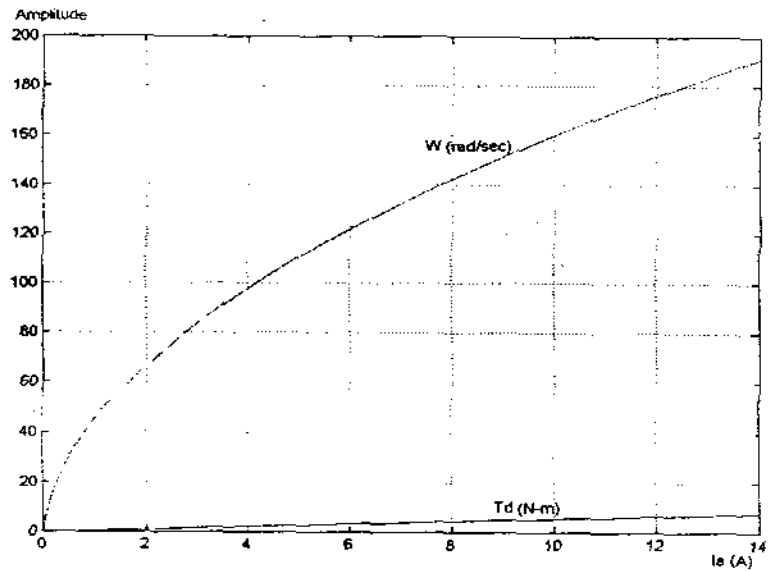
$$k = 1.898 \cdot 10^{-4} \text{ N-m/(rad/sec)}^2$$

เราอาจคำนวณตามสมการ (3-6) อย่างง่ายๆด้วยการแปรค่า I_a แล้วคำนวณ V_t ตาม จะได้กราฟความสัมพันธ์ของ I_a และ V_t ดังรูปที่ 3.2 เมื่ออ่านค่าจากกราฟ จะเห็นว่า ที่ $V_t = 110 \text{ V}$ นั้นมี $I_a = 13.25 \text{ A}$



รูปที่ 3.2 กราฟความสัมพันธ์ I_a และ V_t ที่ป้อนให้มอเตอร์ในการขับโหลดปั๊มหอยโข่ง

สอดคล้องกับในตอนที่เราพิจารณาเรื่องแบบจำลองของปั๊มหอยโข่ง เมื่อนำสมการ (3-5) มาหาความสัมพันธ์ของ (I_a, ω) และจาก $T_d = k_b I_a$ มาหาความสัมพันธ์ของ (I_a, T_d) เราอาจคำนวณลักษณะสมบัติของมอเตอร์เมื่อมีโหลดเป็นปั๊มหอยโข่งได้ดังกราฟในรูปที่ 3.3 ซึ่งอาจสังเกตเห็นว่า I_a และ ω ที่สภาวะคงตัวมีค่าประมาณ 13.25 A และ 185.56 rad/sec ตามลำดับ สอดคล้องกับที่เคยกล่าวถึงในบทที่ 2



รูปที่ 3.3 ลักษณะสมบัติทางความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์กับป้อนเทียบกับ I_a

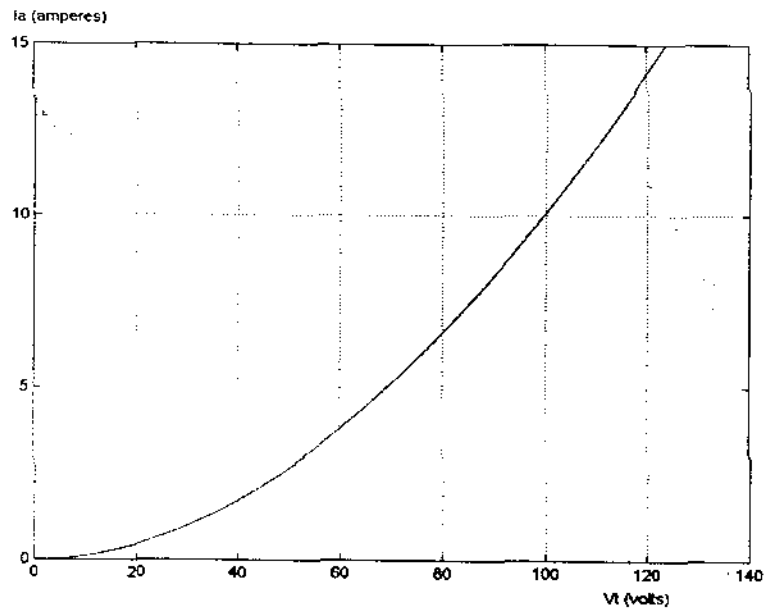
กรณีที่พิจารณาว่าสัมประสิทธิ์ B ในสมการ (3-4) มีค่าน้อยมาก สมการอาจลดรูปเป็น

$$k_b I_a = T_L \quad (3-7)$$

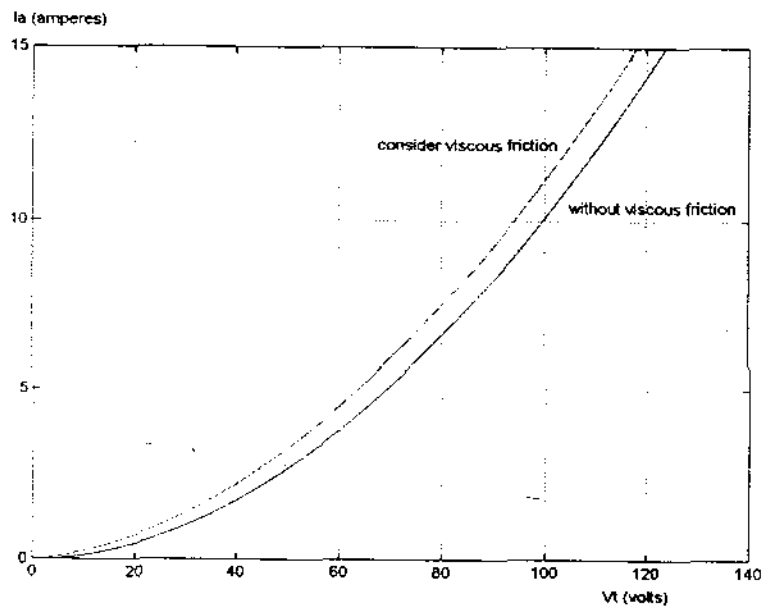
เมื่อนำความสัมพันธ์ $T_L = k \omega^2$ และสมการที่ (3-7) แทนค่าลงในสมการที่ (3-2) แล้วหาค่า V_t จะได้

$$V_t = R_a I_a + (k_b^{1.5}) \sqrt{I_a/k} \quad (3-8)$$

ดังนั้นจากสมการที่ (3-8) เราอาจคำนวณลักษณะสมบัติ V_t ได้ดังรูปที่ 3.4 และเมื่อนำลักษณะสมบัติ V_t ทั้งกรณีที่พิจารณาพจน์ความหนืดกับที่ไม่พิจารณามาวาดกราฟเทียบกัน จะมีลักษณะเป็นดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.4 ลักษณะสมบัติ V_t ของมอเตอร์เมื่อละการพิจารณาพจน์ความหนืด



รูปที่ 3.5 ลักษณะสมบัติ V_t ของมอเตอร์ว่าดเปรียบเทียบกันในกรณีที่พิจารณาและไม่พิจารณาความเสียดทานเชิงความหนืด

3.3 การถ่ายโอนพลังงานสูงสุดเมื่อพิจารณากำลังงานสูญเสียต่าง ๆ ของมอเตอร์

การควบคุมความเร็วของมอเตอร์ตามงานวิจัยนี้ ใช้การเปลี่ยนแปลงแรงดันทางด้านวงจรราร์มเจอร์ โดยรักษาความเข้มสนามคงที่เต็มพิกัด ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ที่มีอยู่ และสอดคล้องกับการใช้งานโหลดของมอเตอร์ที่เป็นปั๊มหอยโข่ง ถึงแม้ว่าการพิจารณาถึงกำลังงานสูญเสียในมอเตอร์ในงานที่ปรากฏส่วนมากจะไม่จ่ายความเข้มสนามที่พิกัดก็ตาม เพราะมอเตอร์อาจต้องการกำลังที่น้อยกว่ากำลังที่พิกัด จากความสัมพันธ์ของแรงดันทางด้านอาร์มเจอร์ที่สภาวะคงตัว ทำให้เราทราบว่าความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ $\omega = \frac{V_t - I_a R_a}{k_b}$

ในขณะที่แรงบิดของปั๊มหอยโข่งคือ $T_L = k\omega^2$

ดังนั้น กำลังงานของ โหลดอาจคำนวณได้ดังนี้

$$P_L = T_L \omega = k\omega^3 = k \left(\frac{V_t - I_a R_a}{k_b} \right)^3 \quad (3-9)$$

ถ้าระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว กำลังงานของโหลด (P_L) จะมีค่าเท่ากับกำลังงานขาออกของมอเตอร์ (P_{out}) ซึ่งกำลังงานขาเข้าของมอเตอร์ (P_{in}) จะมีค่าเท่ากับกำลังงานขาออกของมอเตอร์ (P_{out}) รวมกับกำลังงานสูญเสียทั้งหมดของมอเตอร์ (P_Σ) ดังนั้น

$$P_{in} = V_t I_a = P_{out} + P_\Sigma \quad (3-10)$$

P_Σ นี้ประกอบไปด้วย

กำลังงานสูญเสียในขดลวดอาร์มเจอร์ (armature losses)

กำลังงานสูญเสียในขดลวดสนาม (field winding losses)

กำลังงานสูญเสียในแปรงถ่าน (brush losses)

กำลังงานสูญเสียสเตร (stray losses)

กำลังงานสูญเสียเนื่องจากความฝืดและแรงต้านลม (friction and windage losses) และ

กำลังงานสูญเสียในแกนเหล็ก (core losses)

โดยที่

$$\text{กำลังงานสูญเสียในขดลวดอาร์เมเจอร์} = I_a^2 R_a$$

$$\text{กำลังงานสูญเสียในขดลวดสนาม} = I_f^2 R_f$$

แรงดันที่ตกคร่อมแปรงถ่านจะมีค่าประมาณ 2 V ดังนั้น

$$\text{กำลังงานสูญเสียในแปรงถ่าน} = 2I_a \quad [16]$$

กำลังงานสูญเสียสเตร์ มีค่าเท่ากับ 0.5% (1%) ของกำลังงานพิกัด (nominal power : P_n)

สำหรับมอเตอร์ที่ compensated (uncompensated) ตามลำดับ [17] ในที่นี้พิจารณาว่าเป็นมอเตอร์แบบ compensated ดังนั้น

$$\text{กำลังงานสูญเสียสเตร์} = 0.5\% P_n$$

จากบทความ [15] กำลังงานสูญเสียเนื่องจากความฝืดและแรงต้านลม มีค่าเท่ากับสัมประสิทธิ์ของความฝืดและแรงต้านลมที่พิกัด (f_w) คูณกับกำลังงานขาเข้าของมอเตอร์ (P_{in}) และคูณกับอัตราส่วนของความเร็วเชิงมุมใด ๆ (ω) ต่อความเร็วเชิงมุมพิกัด (ω_n) ยกกำลังสอง $\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2$ ซึ่งในทางปฏิบัติ $0.02 < f_w < 0.05$ (ในที่นี้จะพิจารณา f_w มีค่าเท่ากับ 0.05) ดังนั้น

$$\begin{aligned} \text{กำลังงานสูญเสียเนื่องจากความฝืดและแรงต้านลม} &= f_w P_{in} \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 \\ &= \frac{f_w V_t I_a}{\omega_n^2} \left(\frac{V_t - I_a R_a}{k_b}\right)^2 \end{aligned}$$

กำลังงานสูญเสียในแกนเหล็ก มีองค์ประกอบเป็น hysteresis losses (P_h) รวมกับ eddy current losses (P_c) [15] โดยที่ hysteresis losses มีค่าประมาณ 5% ของ core losses เท่านั้น [18] ดังนั้น

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

ซึ่ง P_{hn} และ P_{cn} คือ ค่า hysteresis และ eddy current losses ที่พิกัดตามลำดับ เนื่องจากในที่นี้เป็น การป้อนความเข้มสนามเต็มพิกัดคงที่ จึงได้ $I_f = I_{fn}$ ดังนั้น

$$\begin{aligned} \text{กำลังงานสูญเสียในแกนเหล็ก} &= P_{hn} \frac{\omega}{\omega_n} + P_{en} \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2 \\ &= \frac{P_{hn}}{\omega_n} \left(\frac{V_t - I_a R_a}{k_b} \right) + \frac{P_{en}}{\omega_n^2} \left(\frac{V_t - I_a R_a}{k_b} \right)^2 \end{aligned}$$

เนื่องจากกำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กนี้มีค่าน้อยมาก อีกทั้งเป็นการยากที่จะหาค่า P_{hn} และ P_{en} ดังนั้น จึงละการพิจารณากำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กในรายละเอียด โดยถือว่ามีค่าน้อยมากหรือคิดค่าเป็นค่าคงที่ค่าหนึ่ง เมื่อทำการหาอนุพันธ์จะได้เป็นศูนย์ ในทำนองเดียวกันกับ [19] เพื่อให้สามารถคำนวณงานออปติไมเซชันได้

เมื่อพิจารณากำลังสูญเสียทั้งหมดดังที่กล่าวมา เราอาจเขียนแสดงสมการที่ (3-10) ได้ว่า

$$P_{in} = V_t I_a = k \left(\frac{V_t - I_a R_a}{k_b} \right)^3 + I_a^2 R_a + I_f^2 R_f + 2I_a + 0.5\% P_n + \frac{fw V_t I_a}{\omega_n^2} \left(\frac{V_t - I_a R_a}{k_b} \right)^2 \quad (3-11)$$

ทำการหาค่ากำลังงานขาเข้าสูงสุด โดยการหาอนุพันธ์อันดับที่หนึ่งของสมการที่ (3-11) เทียบกับ I_a แล้วให้เท่ากับศูนย์ $\left(\frac{dP_{in}}{dI_a} = 0 \right)$ จะได้

$$3k \left(\frac{V_t - I_a^* R_a}{k_b} \right)^2 \left(\frac{-R_a}{k_b} \right) + 2I_a^* R_a + 2 + 2 \left(\frac{fw V_t I_a^*}{\omega_n^2} \right) \left(\frac{V_t - I_a^* R_a}{k_b} \right) \left(\frac{-R_a}{k_b} \right) + \left(\frac{fw V_t}{\omega_n^2} \right) \left(\frac{V_t - I_a^* R_a}{k_b} \right)^2 = 0 \quad (3-12)$$

เมื่อ I_a^* ใน (3-12) คือ กระแสอาร์เมเจอร์ที่ทำให้เกิดกำลังงานขาเข้าของมอเตอร์สูงสุดเมื่อพิจารณากำลังงานสูญเสียต่าง ๆ ของมอเตอร์ประกอบ เราอาจเขียนแสดง (3-12) อย่างสั้นๆ ในรูป

$$AI_a'^2 + BI_a' + C = 0 \quad (3-13)$$

$$\begin{aligned} \text{ซึ่ง} \quad A &= 1 \\ B &= \frac{6\omega_n^2 k R_a^2 V_t + 2\omega_n^2 k_b^3 R_a - 4f w k_b R_a V_t^2}{3f w k_b R_a^2 V_t - 3\omega_n^2 k R_a^3} \\ C &= \frac{f w k_b V_t^3 + 2\omega_n^2 k_b^3 - 3\omega_n^2 k R_a V_t^2}{3f w k_b R_a^2 V_t - 3\omega_n^2 k R_a^3} \end{aligned}$$

จะสังเกตเห็นว่า I_a' ขึ้นอยู่กับค่า V_t อย่างเดียวเท่านั้น เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ตัวอื่นคงที่หมด และทราบค่าจากรายละเอียดที่เคยนำเสนอในบทที่ 2 และจากสมการที่ (3-13) จะได้

$$I_a' = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad \text{เนื่องจากผลลัพธ์ของ } I_a' \text{ ที่ได้จะมีสองค่า แต่ค่า } I_a' \text{ ที่สมจริงกับ}$$

ระบบจะมีเพียงค่าเดียว คือ $I_a' = \frac{-B - \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}$ ทั้งนี้เราอาจตรวจสอบได้โดยการแทน

ค่าตัวเลขและคำนวณตามสูตร ซึ่งผลที่ได้บางค่านำมาแสดงไว้ดังต่อไปนี้

$$V_t = 133 \text{ V}, \quad I_a = 19.3 \text{ และ } 5099 \text{ A}$$

$$V_t = 110 \text{ V}, \quad I_a = 12.49 \text{ และ } 3783 \text{ A}$$

แรงดันอาร์เมเจอร์และกระแสสองชุดข้างต้น แสดงอย่างชัดเจนว่ากระแสที่คำนวณได้หลายพันแอมแปร์นั้นมากเกินไป ค่าที่สมจริงคือค่าน้อยที่คำนวณตามสูตร I_a' ที่กล่าวถึงข้างต้น เมื่อทำการคำนวณโดยลดค่า V_t ไปเรื่อยๆ ก็ยังคงได้ค่ากระแสในทำนองเดียวกันนี้ จนกระทั่ง V_t เป็น 35 V ซึ่งเป็นค่าแรกที่ทำให้ผลคำนวณกระแสไม่สมจริงทั้งสองค่า กล่าวคือให้ผลเป็นลบค่าหนึ่งและเป็นบวกค่าหนึ่งแต่มีขนาดหลายพันแอมแปร์ นอกจากนี้ ยังอาจสังเกตเห็นว่า ก่อนที่จะมีการคำนึงถึงการลดความสูญเสียในมอเตอร์ให้เหลือน้อยที่สุด มอเตอร์กินกระแส $I_a = 13.25 \text{ A}$ แต่หลังจากที่มีการพิจารณาพบว่า กระแสอาร์เมเจอร์ที่เหมาะสมที่สุดเป็น $I_a = 12.49 \text{ A}$ ที่แรงดันพิกัด 110 V

3.4 สรุป

จากผลการคำนวณเมื่อแรงดัน V_1 มีขนาดน้อยกว่า 35 V กระแสที่ได้จะไม่สมจริงนั้น หมายความว่า แนวปฏิบัติเพื่อให้เกิดการจ่ายกำลังแก่มอเตอร์อย่างเหมาะสมที่สุดตามที่นำเสนอ นี้ จะต้องใช้เมื่อมอเตอร์ทำงานในสภาวะคงตัวแล้ว และแรงดันอาร์เมเจอร์จะต้องไม่เกิน 35 V กระแสอาร์เมเจอร์ที่เหมาะสมที่สุดเป็น $I_s = 12.49$ A ที่แรงดันพิกัด 110 V

บทที่ 4

การอพติไมซ์พลังงานเมื่อใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์

4.1 กล่าวนำ

แผงเซลล์แสงอาทิตย์ปัจจุบันยังมีราคาแพง มีประสิทธิภาพต่ำ แต่ก็ยังเป็นเพียงอุปกรณ์เดียวที่มีอยู่ที่ช่วยให้เราสามารถแปลงพลังงาน ที่มีมากับแสงอาทิตย์อย่างเหลือเฟือไปเป็นพลังงานไฟฟ้าเพื่อใช้ประโยชน์โดยตรง การใช้งานแผงเซลล์แสงอาทิตย์จึงต้องคำนึงถึงความคุ้มค่าคุ้มราคาอยู่เสมอ วิธีการทางวิศวกรรมเพื่อให้เกิดความคุ้มค่า จะเป็นความพยายามอพติไมซ์พลังงานทุกๆด้านที่เกี่ยวกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์

เนื่องจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้เอาต์พุตที่ผันแปรอย่างมากไปตามความเข้มแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบแผงเซลล์ การใช้งานจึงจำเป็นต้องเลือกใช้จุดที่แผงเซลล์ให้พลังงานเอาต์พุตสูงสุด ซึ่งต้องพึ่งพาอุปกรณ์ที่เรียกชื่อสั้นๆว่า MPPT (Maximum Power Point Tracker) เนื้อหาบทที่ 4 จึงเริ่มด้วยการอธิบายหลักการของ MPPT จากนั้นจึงกล่าวถึงการอพติไมซ์พลังงานเมื่อใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งจ่าย โดยมีมอเตอร์ขับเคลื่อนน้ำและแบตเตอรี่ในสถานะอัดประจุเป็นโหลด ตามลำดับ

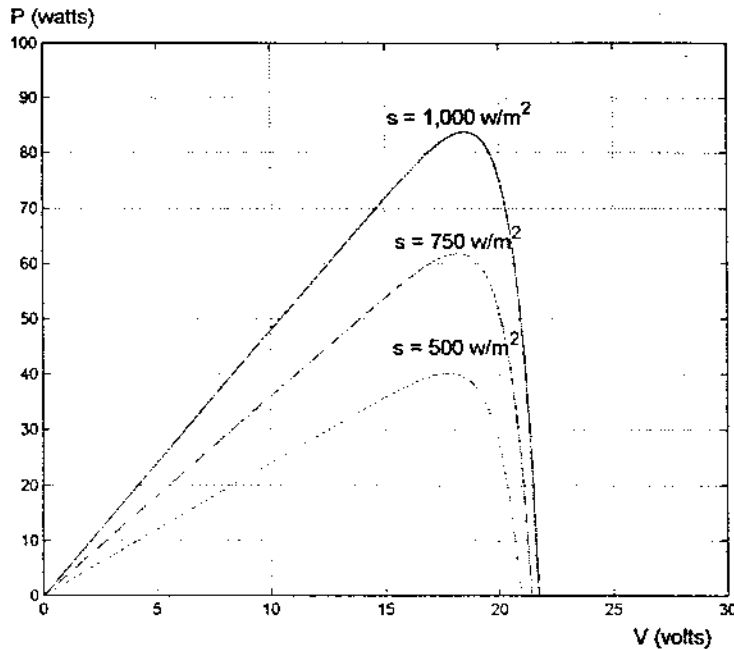
4.2 หลักการทำงานของตัวควบคุมตามรอยกำลังงานสูงสุด (MPPT)

จากเนื้อหาบทที่ 2 ว่าด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เราทราบว่ากระแสจากแผงเซลล์อาจอธิบายได้ด้วยสมการ (4-1)

$$I = n_p I_{ph} - n_p I_{rs} \left[\exp\left(\frac{qV}{kTAn_s}\right) - 1 \right] \quad (4-1)$$

(รายละเอียดตัวแปรต่างๆสามารถทบทวนได้จากบทที่ 2) เมื่อ V คือแรงดันที่แผงเซลล์ผลิตได้ เราสามารถคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้า (P) ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ได้ดังนี้

$$P = IV = n_p I_{ph} V - n_p I_{rs} V \left[\exp\left(\frac{qV}{kTAn_s}\right) - 1 \right] \quad (4-2)$$



รูปที่ 4.1 ลักษณะสมบัติ P เกี่ยวกับ V ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความเข้มแสงต่างๆกัน

กำลังไฟฟ้าที่ได้จากแผงเซลล์ผันแปรตามปริมาณความเข้มแสง รูปที่ 4.1 แสดงปริมาณกำลังไฟฟ้าในสถานะคงตัวที่แผงเซลล์ผลิตตามปริมาณความเข้มแสง การใช้แผงเซลล์อย่างคุ้มค่าต้องให้แผงจ่ายกำลังออกมาสูงสุดอยู่ตลอดเวลา นั่นคือ เราจะใช้อุปกรณ์ MPPT คึงหาปริมาณกำลังไฟฟ้าที่จุดสูงสุดของกราฟ P-V ออกมาใช้ที่ความเข้มแสงใดๆในขณะนั้น ในทางทฤษฎีการหาค่าสูงสุดทำได้โดยการหาอนุพันธ์อันดับที่หนึ่งของสมการที่ (4-2) เทียบกับ V แล้วให้เท่า

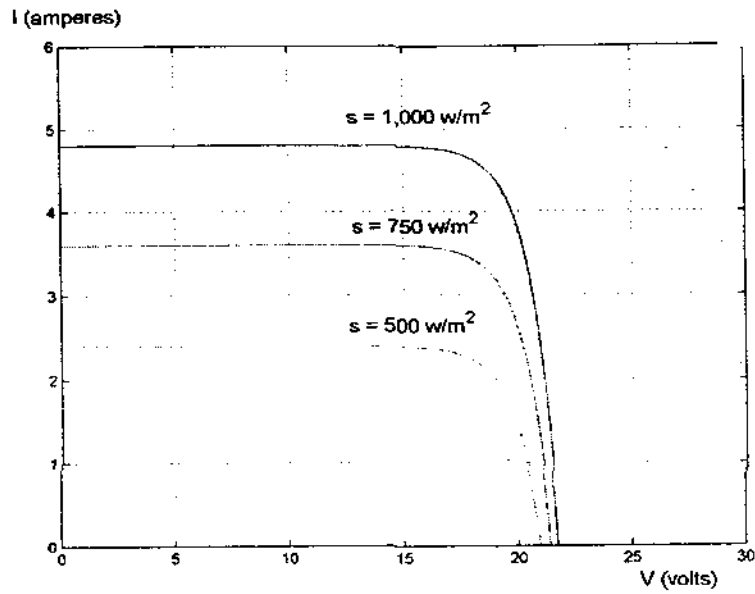
กับศูนย์ $\left(\frac{dP}{dV} = 0\right)$ จะได้ผลดังสมการที่ (4-3)

$$\exp\left(\frac{qV_{P \max}}{kTn_s}\right) \left[\left(\frac{qV_{P \max}}{kTn_s}\right) + 1 \right] = \frac{I_{ph} + I_{rs}}{I_{ph}} \quad (4-3)$$

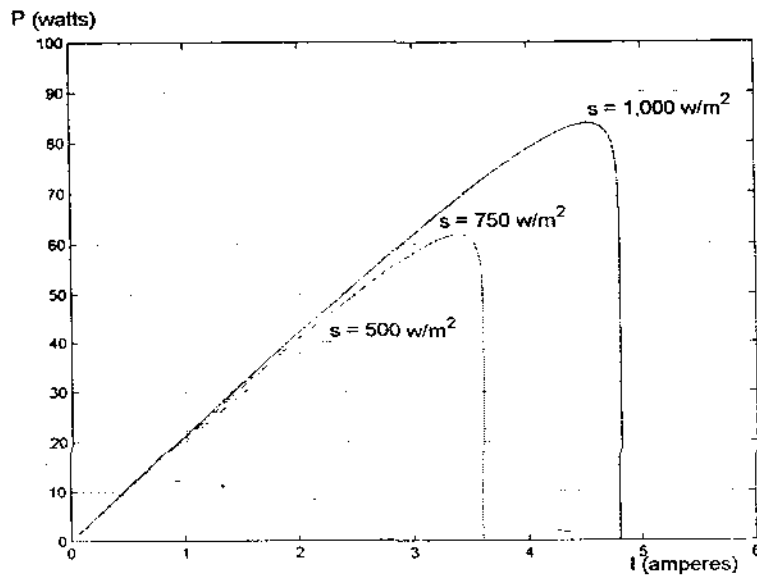
ซึ่ง $V_{P_{max}}$ คือ แรงดันที่ทำให้เกิดกำลังสูงสุด สามารถคำนวณหาได้โดยใช้การคำนวณเชิงตัวเลข $V_{P_{max}}$ จะขึ้นอยู่กับ I_{ph} และ I_{rs} เราสามารถแก้สมการที่ (4-3) โดยใช้วิธีการของนิวตัน (Newton's Method) แล้วนำไปเขียนโปรแกรมเพื่อ คำนวณหาค่า $V_{P_{max}}$ ได้ดังนี้

```
function V2=V3(V1,error)
ns=36;
Iph=4.8;
Irs=1.5619e-8;
q=1.6*10^(-19);
A=2.46;
k=1.38*10^(-23);
T=311;
dx=1;
while dx>error
    x1=exp(q*V1/k/T/A/ns)*((q*V1/k/T/A/ns)+1)-(Iph+Irs)/Irs;
    x2=(q/k/T/A/ns)*exp(q*V1/k/T/A/ns)*((q*V1/k/T/A/ns)+2);
    V2=V1-(x1/x2);
    dx=abs(V1-V2);
    V1=V2;
end
disp(V2);
return
```

จากการคำนวณด้วยโปรแกรมจะได้ค่า $V_{P_{max}} = 18.5111$ V จากนั้นนำค่า $V_{P_{max}}$ แทนกลับลงในสมการที่ (4-1) จะได้ค่า $I_{P_{max}} = 4.5284$ A ดังนั้นจึงคำนวณหา P_{max} ได้เท่ากับ $18.5111 * 4.5284 = 83.8257$ W ซึ่งจะสอดคล้องกับรูปกราฟ (V,P) ดังรูปที่ 4.1 , (V,I) ดังรูปที่ 4.2 และ (I,P) ดังรูปที่ 4.3 ตามลำดับ



รูปที่ 4.2 ลักษณะสมบัติ I เทียบกับ V ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความเข้มแสงต่างๆกัน



รูปที่ 4.3 ลักษณะสมบัติ P เทียบกับ I ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความเข้มแสงต่างๆกัน

การทำงานของอุปกรณ์ MPPT จะค้นหา V และ I ที่แผงเซลล์ผลิตได้ โดยสอดคล้องกับ P_{max} ที่ความเข้มแสงต่างๆ ลักษณะการดำเนินงานจริงอาจเป็นการคำนวณตามความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ดังที่กล่าวผ่านมาแล้ว ดังที่เรียกว่าแบบ on-line หรืออาจใช้การคำนวณจุด P_{max} ต่างๆเอาไว้ล่วงหน้า และใช้การอินเทอร์โพลทช่วยขณะดำเนินงานจริง ดังที่เรียกว่าแบบ off-line และทำการบังคับให้แผงเซลล์ผลิต V และ I โดยสอดคล้องกับ P_{max} ดังนั้นอุปกรณ์ MPPT ในทางปฏิบัติจึงมีส่วนประกอบหลักที่เป็น คอนเวอร์เตอร์และไมโครคอนโทรลเลอร์ ส่วนในการจำลองผลระบบที่จะมีการกล่าวถึงต่อไปนั้น เราอาจจำลองการทำงานของ MPPT ด้วยประโยชน์อีกสร้างขึ้นในโปรแกรมได้

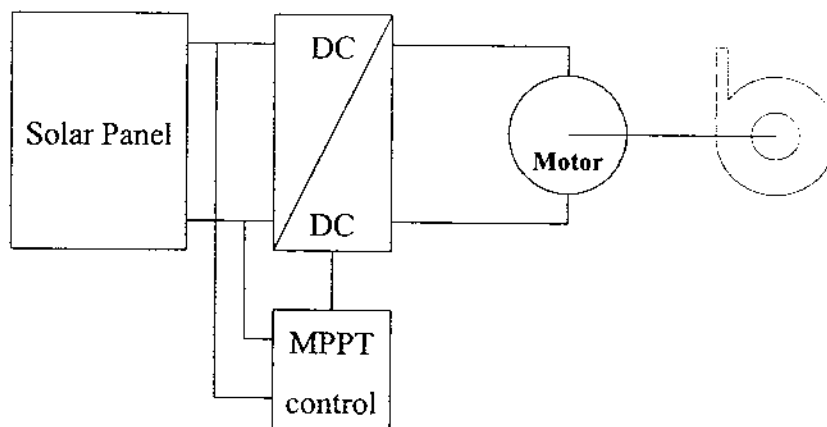
4.3 การถอดโมเดลพลังงานเมื่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งจ่ายแก่มอเตอร์ขับปั้มน้ำ

เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์มีจุดการทำงานของแรงดันและกระแสเอาต์พุตช่วงกว้างมาก แต่จุดที่จะให้กำลังสูงสุดได้นั้นมีเพียงแก่จุดเดียว จึงเกิดปัญหาขึ้นคือ จุดการทำงานของโหลดอยู่ห่างจากจุดที่เซลล์แสงอาทิตย์ให้กำลังงานสูงสุด ซึ่งจะทำให้ได้รับประโยชน์จากกำลังงานที่ผลิตได้ไม่เต็มที่ ดังนั้นจึงทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดลง การแก้ปัญหาจึงอาศัยการทำงานของ MPPT ดังที่ได้อธิบายผ่านมาแล้ว การทำงานของ MPPT เองต้องพึ่งพาคอนเวอร์เตอร์ ที่อาจเรียกว่าหม้อแปลงดีซี (DC-DC Transformer) ซึ่งโดยโครงสร้างอาจเป็นวงจรสับไฟฟ้า (chopper) ชนิดบัก (buck) บู้สต์ (boost) หรือบัก/บู้สต์ก็ได้ตามความเหมาะสม โดยเราแสดงการทำงานของคอนเวอร์เตอร์นี้ในรูปอัตราส่วนการแปลงพลังงานหรือเรียกสั้นๆว่า อัตราส่วนการแปลง (transformation ratio) D ค่า D ที่เหมาะสมที่สุดทำให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายพลังงานไฟฟ้าออกมาสูงสุด ($P_{max} = V_{Pmax} \cdot I_{Pmax}$) เพื่อใช้ในการขับหรือจ่ายโหลดซึ่งมีการพิจารณาแบ่งออกเป็น 3 ลักษณะการทำงาน ได้แก่ (ก) มอเตอร์กระแสตรงแบบกระตุ้นฟิลด์แยกส่วนต่อควบกับปั้มน้อยโคงเป็นโหลด (ข) แบตเตอรี่ขณะอัดประจุเป็นโหลด และ (ค) ทั้งมอเตอร์ ปั้มน้ำ และ แบตเตอรี่ขณะอัดประจุพลังงานเป็นโหลดพร้อมๆกัน ดังแผนภาพแทนระบบในรูปที่ 4.4

ในหัวข้อนี้ เราพิจารณากรณีที่มีโหลดแบบ (ก) ก่อน เมื่อไม่คิดค่ากำลังงานสูญเสียของหม้อแปลงดีซี จะได้ความสัมพันธ์ของกำลังงานว่า

$$\begin{aligned} V_{in} I_{in} &= V_{out} I_{out} \\ \frac{V_{out}}{V_{in}} &= \frac{I_{in}}{I_{out}} = D \end{aligned} \quad (4-4)$$

- D คือ อัตราส่วนการแปลง (Transformation Ratio)
 V_{in} คือ แรงดันทางด้านอินพุตของ หม้อแปลงคัตซี
 V_{out} คือ แรงดันทางด้านเอาต์พุตของ หม้อแปลงคัตซี
 I_{in} คือ กระแสทางด้านอินพุตของ หม้อแปลงคัตซี
 I_{out} คือ กระแสทางด้านเอาต์พุตของ หม้อแปลงคัตซี



รูปที่ 4.4 โครงสร้างของระบบเมื่อมีหม้อแปลงคัตซีใช้งานร่วมกับMPPT

นำสมการที่ (3-6) มาพิจารณาเป็นสมการ(4-5)ในขณะนี้ ที่สถานะคงตัวความสัมพันธ์ของแรงดันทางด้านอาร์เมเจอร์แสดงได้ว่า

$$V_t = R_a I_a + k_b \left[\frac{-B k + \sqrt{(B/k)^2 + (4k_b I_a / k)}}{2} \right] \quad (4-5)$$

เมื่อ $R_a = 0.6 \Omega$, $B = 0.004 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{sec}/\text{rad}$, $k_b (\text{V}/\text{rad}/\text{sec}) = 0.55 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{A}$,
 $k = 1.898 \cdot 10^{-4} \text{ N}\cdot\text{m}/(\text{rad}/\text{sec})^2$ เป็นค่าคงที่ต่างๆของมอเตอร์

ถ้าแผงเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายพลังงานไฟฟ้าออกมาสูงสุด ($P_{max} = V_{Pmax} \cdot I_{Pmax}$) เพื่อใช้ในการขับมอเตอร์ผ่าน หม้อแปลงคัตซี แล้ว ดังนั้น

$$D_m = \frac{V_t}{V_{P_{\max}}} = \frac{I_{P_{\max}}}{I_a} \quad (4-6)$$

เมื่อ D_m คือค่าอัตราส่วนการแปลงระหว่างแอมเพอร์แอสองอาทิตย์กับมอเตอร์
นำสมการที่ (4-6) แทนค่าลงในสมการที่ (4-5) จะได้

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

โดยใช้วิธีการของนิวตัน (Newton's Method) การคำนวณค่า D_m อาจทำได้จากโปรแกรมดังนี้
%Find transformation ratio:Dm

```
function D2=Dm(Vm,Im,D1,error)
```

```
Ra=0.6;
```

```
B=0.004;
```

```
kb=0.55;
```

```
k=1.898*10^(-4);
```

```
dx=1;
```

```
while dx>error
```

```
    x1=D1-(kb/Vm)*((-B/(2*k))+1/2)*sqrt((B/k)^2+(4*kb*Im/(D1*k)))-Im*Ra/(D1*Vm);
```

```
    x2=1+((kb^2*Im)/(D1^2*Vm*k*sqrt((B/k)^2+(4*kb*Im/(D1*k)))+(Im*Ra/(D1^2*Vm)));
```

```
    D2=D1-(x1/x2);
```

```
    dx=abs(D1-D2);
```

```
    D1=D2;
```

```
end
```

```
disp(D2);
```

```
return
```

จากการคำนวณด้วยโปรแกรม ถ้าแผงเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายแรงดันที่ทำให้เกิดกำลังงานสูงสุด $V_{Pmax} = 110 \text{ V}$ และจ่ายกระแสที่ทำให้เกิดกำลังงานสูงสุด $I_{Pmax} = 13.25 \text{ A}$ แล้ว จะได้ค่า $D_m = 1.000$ ดังนั้นแสดงว่าค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมถูกต้อง เนื่องจาก ได้ทราบมาก่อนแล้วว่า ที่สภาวะคงตัวนั้น มอเตอร์มีแรงดันทางด้านอาร์เมเจอร์ $V_a = 110 \text{ V}$ และมีกระแสอาร์เมเจอร์ $I_a = 13.25 \text{ A}$ เมื่อเดินเครื่องขับปั๊มหอยโข่ง เพื่อให้การหาค่า D_m ง่ายขึ้น เราอาจจะละทิ้งพจน์ความหนืด (viscous friction = $B\omega$) เนื่องจากมีค่าน้อยมาก [20] ดังนั้นจากสมการที่(3-8) เราทราบว่าแรงดันทางด้านอาร์เมเจอร์ ที่สภาวะคงตัวคือ

$$V_a = R_a I_a + (k_b^{1.5}) \sqrt{I_a/k} \quad (4-8)$$

นำสมการที่ (4-6) แทนค่าลงในสมการที่ (4-8) จะได้

$$D_m^3 - \frac{R_a I_{Pmax}}{V_{Pmax}} D_m - \frac{(k_b^{1.5})}{V_{Pmax}} \sqrt{\frac{I_{Pmax}}{k}} = 0 \quad (4-9)$$

แก้สมการ (4-9) ด้วยคำสั่ง polynomial ง่ายๆ

```
%Find transformation ratio:Dm
```

```
function polymotor(Vm,Im)
```

```
Ra=0.6;
```

```
kb=0.55;
```

```
k=1.898*10^(-4);
```

```
X=[1 0 (-Ra*Im/Vm) ((-kb^1.5/Vm)*sqrt(Im/k))];
```

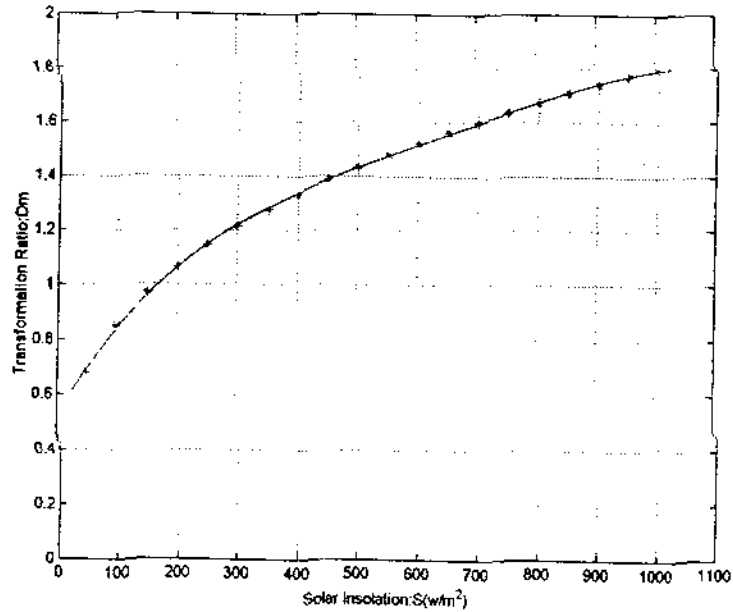
```
Dm=roots(X)
```

ก็จะได้ค่าประมาณของ D_m ถ้าแผงเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายแรงดันที่ทำให้เกิดกำลังงานสูงสุด $V_{Pmax} = 110 \text{ V}$ และจ่ายกระแสที่ทำให้เกิดกำลังงานสูงสุด $I_{Pmax} = 13.25 \text{ A}$ แล้ว จะได้ค่า $D_m = 1.0175$ (พิจารณาเฉพาะค่า D_m ที่เป็นจำนวนจริง) ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีค่าแตกต่างกับกรณีพิจารณาความหนืดเพียงเล็กน้อย

ทำการหาค่าของ D_m เมื่อมีแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งหมดจำนวน 200 โมดูล ($n_p = 25$, $n_s = 8 \times 36$) ซึ่งได้มาจากการออกแบบระบบเมื่อพิจารณาค่าความเข้มแสงอาทิตย์สม่ำเสมอตลอดทั้งวัน โดยเรานำค่าของ V_{Pmax} และ I_{Pmax} ที่ได้จากการทำงานของ MPPT ที่ความเข้มแสงต่าง ๆ กัน มาแทนค่าลงในสมการ(4-7) เพื่อหาค่า D_m ที่เหมาะสม แสดงเป็นตารางและกราฟได้ ดังนี้

ตารางที่ 4.1 อัตราส่วนการแปลงที่สัมพันธ์กับปริมาณความเข้มแสงอาทิตย์กระจายตลอดวันฟ้าเปิด

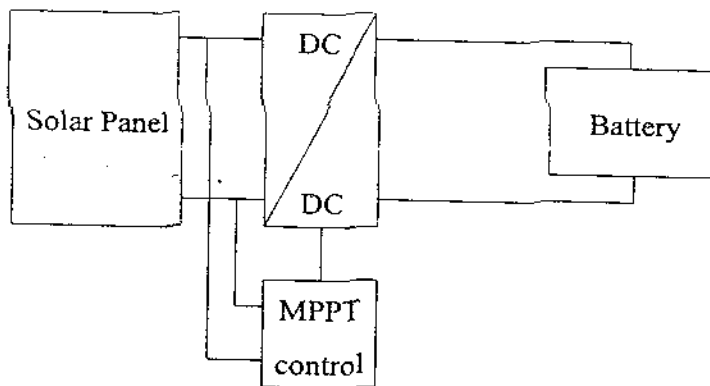
ความเข้มแสง (w/m^2)	V_{Pmax} (V)	I_{Pmax} (A)	D_m
1,000	148.09	113.21	1.8011
950	147.66	107.53	1.7706
900	147.20	101.85	1.7391
850	146.72	96.18	1.7065
800	146.21	90.50	1.6725
750	145.67	84.83	1.6372
700	145.09	79.15	1.6003
650	144.47	73.48	1.5616
600	143.80	67.81	1.5210
550	143.07	62.14	1.4782
500	142.27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



รูปที่ 4.5 อัตราส่วนการแปลงของหม้อแปลงคัตซีแปรผันตามปริมาณความเข้มแสงอาทิตย์ เมื่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีโหลดเป็นมอเตอร์ต่อควบกับปั้มน้ำ

4 การออกดีโมซ์พลังงานเมื่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งจ่ายแก่แบตเตอรี่

ระบบในขณะนี้มีการทำงานที่อาจแทนได้ดังรูปที่ 4.6 การพิจารณาการถ่ายโอนพลังงานอย่างเหมาะสมที่สุด ดำเนินการในลักษณะที่คล้ายกับหัวข้อที่ 4.3 ดังมีรายละเอียดต่อไปนี้



รูปที่ 4.6 โครงสร้างของระบบเมื่อค่านิ่งว่าแบตเตอรี่ขณะอัคประจุเป็น โหลดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

ในการพิจารณาค่าอัตราส่วนการแปลงของหม้อแปลงคิซี เพื่อถ่ายโอนพลังงานระหว่างแผงเซลล์แสงอาทิตย์กับแบตเตอรี่ขณะอัดประจุ จะไม่คำนึงถึงช่วงที่แรงดันเพิ่มขึ้นอย่างกะทันหัน เพราะเหตุการณ์ดังกล่าวเกิดขึ้นภายในเวลาสั้นมากเป็นมิลลิวินาที ดังนั้นสมการแรงดันของแบตเตอรี่ขณะอัดประจุ จะคิดเฉพาะช่วงที่มีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้น กล่าวคือ

$$V_b = V_0 + IR_{tot} \quad (4-10)$$

ซึ่ง V_b คือ แรงดันที่ขั้วของแบตเตอรี่ขณะอัดประจุ

V_0 คือ แรงดันเริ่มต้นของแบตเตอรี่ในแต่ละอัตราการอัดประจุ (ในที่นี้จะพิจารณาที่แรงดันเริ่มต้นในช่วงที่มีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้น)

R_{tot} คือ ค่าความต้านทานภายในรวมขณะอัดประจุ

I คือ ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลในแบตเตอรี่ขณะอัดประจุ

ถ้าแผงเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายพลังงานไฟฟ้าออกมาสูงสุด ($P_{max} = V_{Pmax} \cdot I_{Pmax}$) ให้แก่แบตเตอรี่ผ่านหม้อแปลงคิซีแล้ว

$$D_b = \frac{V_b}{V_{Pmax}} = \frac{I_{Pmax}}{I} \quad (4-11)$$

เมื่อ D_b คือค่าอัตราส่วนการแปลงระหว่างแผงเซลล์แสงอาทิตย์กับแบตเตอรี่ นำสมการที่ (4-11) แทนลงในสมการที่ (4-10) จะได้

$$D_b^2 - \frac{V_0}{V_{Pmax}} D_b - \frac{I_{Pmax} R_{tot}}{V_{Pmax}} = 0 \quad (4-12)$$

แก้สมการกำลัง 2 โดยพิจารณาเฉพาะ D_b ที่เป็นค่าบวก จะได้

$$D_b = \frac{1}{2} \left[\frac{V_0}{V_{P_{max}}} + \sqrt{\left(\left(\frac{V_0}{V_{P_{max}}} \right)^2 + \frac{4I_{P_{max}}R_{tot}}{V_{P_{max}}} \right)} \right] \quad (4-13)$$

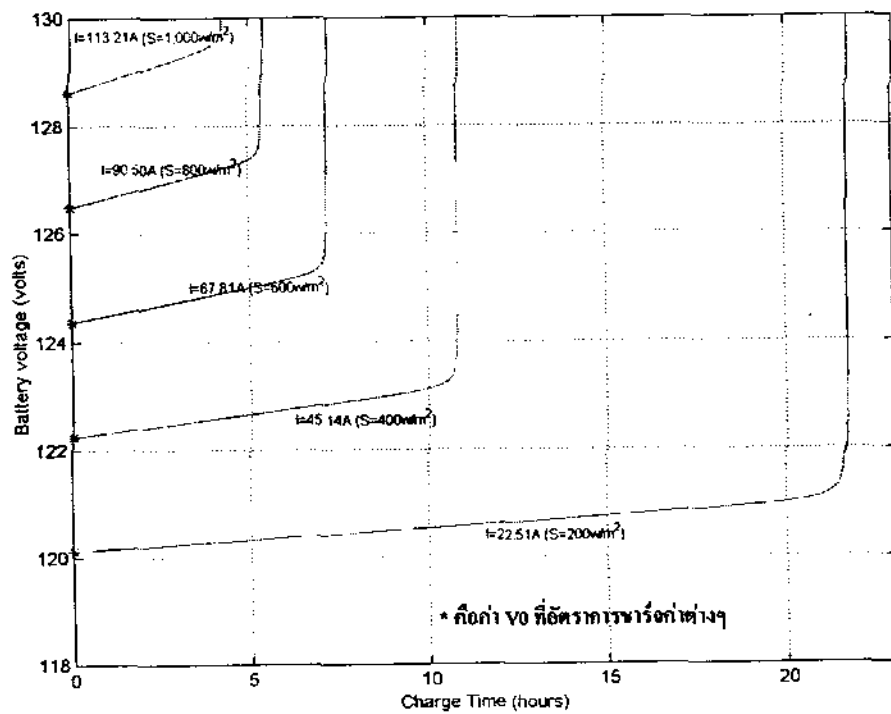
ทำการหาค่าของ D_b เมื่อมีแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งหมดจำนวน 200 โมดูล ($n_p = 25$, $n_s = 8 \times 36$) ใช้งานภายใต้ความเข้มแสงอาทิตย์สม่ำเสมอตลอดทั้งวันที่ฟ้าเปิด จากที่ผ่านมาระวจะนำค่าของ $V_{P_{max}}$ และ $I_{P_{max}}$ ที่ได้จากการทำงานของ MPPT ที่ความเข้มแสงต่าง ๆ ที่คำนวณผ่านมาแล้ว มาแทนค่าลงในสมการที่ (4-13) เพื่อหาค่า D_b ที่เหมาะสม จะมีค่า R_{tot} ของเบตเตอรี่ทั้งหมด 70 ลูก $= (10/7) \times 6.56E-2 \Omega$ แต่ในสมการที่ (4-13) นี้ ยังต้องทราบค่า V_0 ด้วย ซึ่ง V_0 คือค่าแรงดันเริ่มต้นของเบตเตอรี่ โดยเราจะพิจารณาค่า V_0 ในช่วงที่มีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นเท่านั้น และแต่ละอัตราการอัดประจุ I (แต่ละความเข้มแสง) ก็จะมีค่า V_0 ที่แตกต่างกันด้วย ซึ่งสามารถแสดงได้ดังกราฟในรูปที่ 4.7 โดยที่ความเข้มแสง $1,000 \text{ w/m}^2$, 800 w/m^2 , 600 w/m^2 , 400 w/m^2 และ 200 w/m^2 มีอัตราการอัดประจุ $I_{P_{max}}$ เท่ากับ 113.21 A , 90.50 A , 67.81 A , 45.14 A และ 22.51 A ตามลำดับ

จากกราฟในรูปที่ 4.7 จะสังเกตเห็นว่า แต่ละอัตราการอัดประจุ $I_{P_{max}}$ จะมีค่า V_0 ที่แตกต่างกัน ที่ความเข้มแสง $1,000 \text{ w/m}^2$ มีอัตราการอัดประจุ $I_{P_{max}}$ เท่ากับ 113.21 A จะมีค่า V_0 เท่ากับ 128.61 V และที่ความเข้มแสง 800 w/m^2 ซึ่งมีอัตราการอัดประจุ $I_{P_{max}}$ เท่ากับ 90.50 A จะมีค่า V_0 เท่ากับ 126.49 V เป็นต้น ซึ่งค่า V_0 สามารถคำนวณได้จากแบบจำลองของเบตเตอรี่ โดยพิจารณาที่เวลาเป็นศูนย์ ซึ่งที่เวลาเป็นศูนย์นี้จะได้ V_0 ออกมาในช่วงที่มีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้น ดังสมการ (4-14)

$$V_0 = E + (R_{tot} \cdot I) + \frac{K2}{C} \quad (4-14)$$

โดยที่ $E = 118 \text{ V}$ (ถ้าอัตราการอัดประจุ I คงที่ตลอดจนอัดประจุเต็ม ค่า E ก็จะมีค่าเท่ากับแรงดันค่าสุดท้ายที่สภาวะการอัดประจุอย่างนี้ไปตลอดเช่นกัน), $R_{tot} = (10/7) \times 6.56E-2 \Omega$,

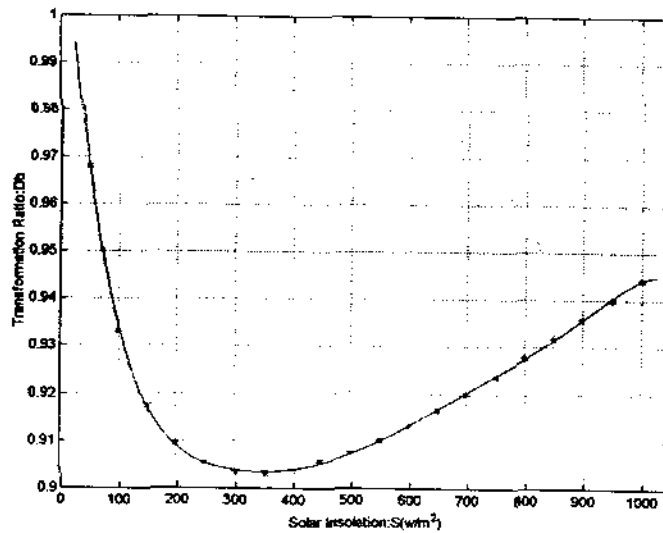
$C = 7 \times 70 \text{ Ah}$, และ $K2 = 2.2$ ดังนั้นในการหาค่า D_0 ตามสมการที่ (4-13) จะต้องคำนึงถึงค่า V_0 ในแต่ละอัตราการอัดประจุ I_{Pmax} นั้นๆ ด้วย เมื่อนำค่าของ V_{Pmax} , I_{Pmax} ที่ได้จากการทำงานของ MPPT และค่าของ V_0 ที่ได้จากการคำนวณในสมการที่ (4-14) ที่ความเข้มแสงต่างๆ มาแทนค่าลงในสมการที่ (4-13) อาจหาค่า D_0 ที่เหมาะสมได้ ดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.7 ลักษณะสมบัติการอัดประจุสอดคล้องกับความเข้มแสงอาทิตย์ต่างๆที่กระแสอัดประจุคงที่ระดับต่างๆกัน

ตารางที่ 4.2 อัตราส่วนการแปลงที่เหมาะสมเมื่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์อิคประจุแบบเคอร์รี่อย่างเดี่ยว

ความเข้มแสง (w/m^2)	V_{Pmax} (V)	I_{Pmax} (A)	V_o (V)	D_b
1,000	148.09	113.21	128.61	0.9443
950	147.66	107.53	128.08	0.9400
900	147.20	101.85	127.55	0.9358
850	146.72	96.18	127.02	0.9317
800	146.21	90.50	126.49	0.9277
750	145.67	84.83	125.95	0.9237
700	145.09	79.15	125.42	0.9200
650	144.47	73.48	124.89	0.9165
600	143.80	67.81	124.36	0.9132
550	143.07	62.14	123.83	0.9102
500	142.27	56.47	123.30	0.9076
450	141.38	50.81	122.77	0.9056
400	140.40	45.14	122.23	0.9039
350	139.28	39.48	121.70	0.9032
300	137.99	33.82	121.17	0.9035
250	136.46	28.17	120.64	0.9054
200	134.59	22.51	120.11	0.9096
150	132.19	16.87	119.59	0.9177
100	128.80	11.23	119.06	0.9331
50	123.02	5.60	118.53	0.9679

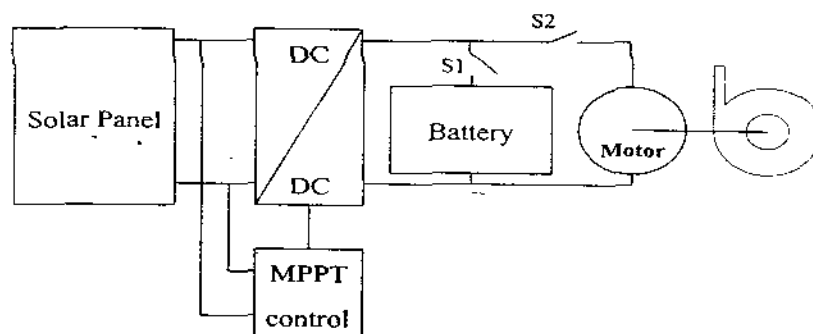


รูปที่ 4.8 อัตราส่วนการแปลงของหม้อแปลงคิซีแปรผันตามปริมาณความเข้มแสงอาทิตย์เมื่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีโหลดเป็นแบตเตอรี่กำลังอัดประจุ

ค่า D_c ที่ได้จะนำไปพล็อตกราฟความสัมพันธ์กับความเข้มแสง ได้ดังรูปที่ 4.8

4.5 การออกแบบโครงข่ายพลังงานเมื่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายพลังงานแก่มอเตอร์และแบตเตอรี่

ระบบแบบใช้พลังงานแสงอาทิตย์เต็มรูปแบบ อาจแทนด้วยแผนภาพดังรูปที่ 4.9 การดำเนินงานหาอัตราส่วนการแปลงที่เหมาะสมระหว่างแผงเซลล์แสงอาทิตย์และโหลด มีรายละเอียดต่อไปนี้



รูปที่ 4.9 โครงสร้างของระบบเมื่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายพลังงานแก่แบตเตอรี่และมอเตอร์ไปพร้อมกัน

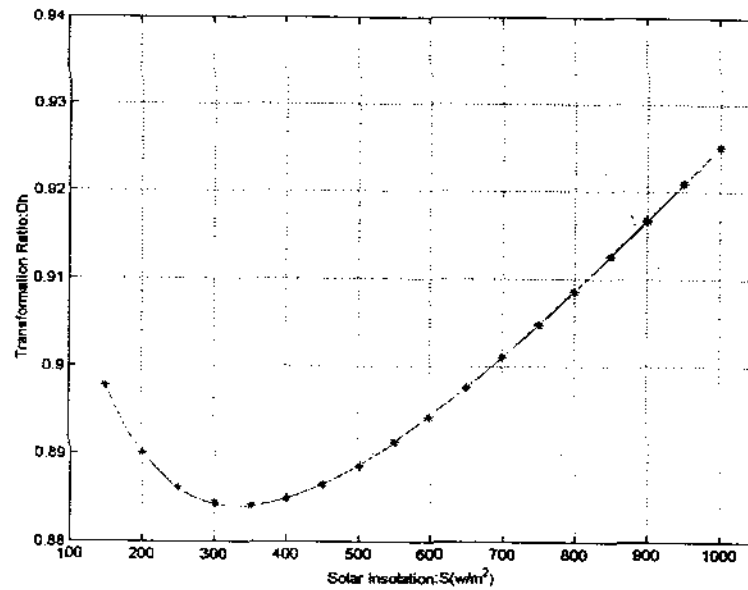
ในงานที่ปรากฏมาก่อนแล้ว [21] ได้พิจารณามอเตอร์เป็นความต้านทานตัวหนึ่งที่ค่อนข้างนานกับแบตเตอรี่ แต่ในงานวิจัยนี้ เพื่อให้ได้ผลที่แม่นยำมากขึ้นจึงพิจารณามอเตอร์ตามลักษณะสมบัติที่สมจริง ดังที่ได้อธิบายไว้ในส่วนที่เกี่ยวกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในกรณีที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายพลังงานไฟฟ้าให้ทั้งมอเตอร์และแบตเตอรี่ แรงดันที่ตกคร่อมมอเตอร์และแบตเตอรี่จะมีค่าเท่ากับแรงดันที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ ส่วนกระแสที่ดึงจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จะมีค่าเท่ากับกระแสที่ใช้ขับมอเตอร์ร่วมกับกระแสที่ใช้อัดประจุแบตเตอรี่ ถ้าแผงเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายพลังงานไฟฟ้าออกมาสูงสุด ($P_{\max} = V_{P_{\max}} \cdot I_{P_{\max}}$) เพื่อใช้ในการขับมอเตอร์และจ่ายให้แก่แบตเตอรี่ ผ่านหม้อแปลงคิซีแล้ว ดังนั้น จากสมการที่ (4-5) และ (4-10) จะได้

$$D_h = \frac{V_i}{V_{P_{\max}}} = \frac{V_b}{V_{P_{\max}}} = \frac{I_{P_{\max}}}{I_a + I} \quad (4-15)$$

เมื่อ D_h คือ ค่าอัตราส่วนการแปลง ในกรณีที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์มีโหลดเป็นมอเตอร์ต่อควบกับปั๊มและแบตเตอรี่กำลังอัดประจุ ถ้าเรานำสมการที่ (4-5) และ (4-10) แทนค่าลงในสมการที่ (4-15) จะได้

$$\frac{k_b}{2} \sqrt{\left(\frac{B}{k}\right)^2 + 4k_b \left(\frac{I_{P_{\max}} R_{\text{tot}} - D_h^2 V_{P_{\max}} + D_h V_0}{D_h k R_{\text{tot}}}\right)} + R_s \left(\frac{I_{P_{\max}} R_{\text{tot}} - D_h^2 V_{P_{\max}} + D_h V_0}{D_h R_{\text{tot}}}\right) - D_h V_{P_{\max}} - \frac{k_b B}{2k} = 0 \quad (4-16)$$

ค่า D_h อาจหาได้เมื่อทราบค่า $V_{P_{\max}}$, $I_{P_{\max}}$ และ V_0 ซึ่งค่า V_0 หาได้จากอัตราการอัดประจุแบตเตอรี่ ดังที่ได้กล่าวถึงมาก่อนแล้ว การแก้สมการที่ (4-16) สามารถใช้วิธีของนิวตันแบบธรรมดา โดยมีผลการคำนวณค่า D_h ได้รับการแสดงไว้ในรูปที่ 4.10 และตารางที่ 4.3 ตามลำดับ



รูปที่ 4.10 อัตราส่วนการแปลงของหม้อแปลงคิซีแปรผันตามปริมาณความเข้มแสงอาทิตย์เมื่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีโหลดเป็นมอเตอร์ขับปั๊มน้ำและแบตเตอรี่กำลังอัดประจุ

4.6 อภิปรายและสรุปผล

จากการดำเนินงานออปติไมซ์พลังงานที่ผ่านมาในหัวข้อ 4.3 – 4.5 อาจกล่าวได้ว่าช่วงเวลาทำงานโดยส่วนใหญ่ ของระบบพลังงาน แผงเซลล์แสงอาทิตย์จะมีโหลดคร่อมเป็นมอเตอร์ขับเคลื่อนปั๊มน้ำและแบตเตอรี่รับการอัดประจุ จึงจะเป็นการใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้อย่างคุ้มค่า ปัญหาทางเทคนิควิศวกรรมนั้นอยู่ที่ ทำอย่างไรจึงจะสามารถดึงพลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ออกมาใช้ให้ได้มากที่สุด ตารางที่ 4.3 จึงเป็นคำตอบที่ดีที่สุดเพื่อการออปติไมซ์พลังงานตามต้องการ นั้นหมายความว่าในทางปฏิบัติเราจะควบคุม ให้หม้อแปลงคิซีทำงานด้วยอัตราส่วนการแปลงเหล่านั้น เมื่อสังเกตข้อมูลในตารางที่ 4.3 จะเห็นว่าข้อมูลสิ้นสุดที่ความเข้มแสง 150 w/m² ที่ระดับความเข้มแสงต่ำกว่านี้ผลการคำนวณที่ได้ไม่สมจริง ซึ่งหมายถึงการใช้ระบบพลังงานดังกล่าวอย่างมีโหลดเดียว เป็นโหลดใดก็ได้ตามปริมาณพลังงานที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถจ่ายได้ ดังนั้นในสถานะที่ความเข้มแสงน้อยกว่า 150 การทำงานของหม้อ

แปลงคี่ซึ่งจะมีอัตราส่วนการแปลง ตามที่ได้คำนวณไว้แล้วและแสดงในตารางที่ 4.1 และ 4.2 สอดคล้องกับประเภทของโหลด

ตารางที่ 4.3 อัตราส่วนการแปลงที่เหมาะสมเมื่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดขั้วอึดประจุแบตเตอรี่และ
จ่ายให้มอเตอร์ไปพร้อมๆกัน

ความเข้มแสง (w/m^2)	$V_{P_{max}}$ (V)	$I_{P_{max}}$ (A)	I (A)	V_o (V)	D_h
1,000	148.09	113.21	99.96	127.37	0.9251
950	147.66	107.53	94.28	126.84	0.9209
900	147.20	101.85	88.60	126.31	0.9167
850	146.72	96.18	82.93	125.78	0.9126
800	146.21	90.50	77.25	125.24	0.9086
750	145.67	84.83	71.58	124.71	0.9047
700	145.09	79.15	65.90	124.18	0.9010
650	144.47	73.48	60.23	123.65	0.8975
600	143.80	67.81	54.56	123.12	0.8942
550	143.07	62.14	48.89	122.59	0.8913
500	142.27	56.47	43.22	122.06	0.8886
450	141.38	50.81	37.56	121.52	0.8865
400	140.40	45.14	31.89	120.99	0.8848
350	139.28	39.48	26.23	120.46	0.8840
300	137.99	33.82	20.57	119.93	0.8843
250	136.46	28.17	14.92	119.40	0.8861
200	134.59	22.51	9.26	118.87	0.8901
150	132.19	16.87	3.62	118.34	0.8978

บทที่ 5

การจำลองผลระบบ

5.1 กล่าวนำ

ระบบพลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งเป็นที่สนใจของงานวิจัยนี้ ได้รับการกล่าวถึงมาแล้วในระดับหนึ่งโดยอ้างอิงรูปที่ 4.9 เพื่อการออกผลไมซ์พลังงานในลักษณะอุปกรณ์ต่ออุปกรณ์ การออกผลไมซ์พลังงานยังสามารถทำได้อีกระดับหนึ่ง ที่เรียกกันว่าเป็นระดับของการกำกับสั่งการ (supervisory control) การควบคุมรูปแบบนี้ต้องทราบภาพรวมทางพลวัตของระบบ จึงจะสามารถดำเนินการออกแบบชุดควบคุมได้ เนื่องจากระบบพลังงานที่กล่าวถึงนี้มีความไม่เป็นเชิงเส้นที่ซับซ้อน การทำความเข้าใจเกี่ยวกับพลวัตด้านพลังงานโดยรวมของระบบ จึงต้องพึ่งพาการจำลองสถานการณ์หรือการจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์ (computer simulation) บทที่ 5 จึงบรรยายเนื้อหาในส่วนนี้โดยอ้างอิงรูปที่ 4.9 แสดงโครงสร้างของระบบ เนื้อหาในบทนี้เริ่มด้วยการทำความเข้าใจถึงรูปลักษณะของความเข้มแสงอาทิตย์ประจำวัน การจัดอุปกรณ์ในระบบ ในหัวข้อสุดท้ายเป็นโครงสร้างของโปรแกรมจำลองผลและตัวอย่างของผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรม

5.2 ความเข้มแสงอาทิตย์

ความเข้มแสงอาทิตย์ (insolation) หมายถึงปริมาณแสงอาทิตย์ที่สาดส่องลงบนผิวโลก ในช่วงกลางวันของแต่ละวัน สำหรับประเทศไทยค่าความเข้มแสงอาทิตย์เฉลี่ยทั่วประเทศจากทุกพื้นที่ มีค่าเท่ากับ $5,000 \text{ w.hr/m}^2/\text{day}$ โดยทั่วไปแล้วมักจะสมมุติการพิจารณาว่าใน 1 วัน (24 ชั่วโมง) มีเพียงแค่ 5 ชั่วโมงเท่านั้น ที่แสงอาทิตย์มีความเข้มมากพอที่จะทำให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตพลังงานได้ ในความเป็นจริงนั้น ค่าความเข้มแสงอาทิตย์ไม่ได้มีค่าสม่ำเสมอ บทความ[22] ได้แสดงค่าความเข้มแสงอาทิตย์กระจายตลอดช่วงเวลากลางวัน เป็นรูปพาราโบลาคว่ำซึ่งมีพื้นที่ใต้กราฟเท่ากับ $5,000 \text{ w.hr/m}^2/\text{day}$ พาราโบลาคว่ำมีสมการทั่วไปอยู่ในรูป

$$(x-h)^2 = -4p(y-k) \quad (5-1)$$

ซึ่ง (h,k) คือ จุดยอดของพาราโบลา

p คือ ระยะทางที่วัดจากจุดยอดไปตามแกนของพาราโบลา

การหาค่าความเข้มแสงอาทิตย์ตามการพิจารณาพาราโบลาคว่ำ ดังรูปที่ 5.1 จะได้ความสัมพันธ์

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

หรือ
$$S = S_m - \frac{1}{4p}\left(t - \frac{T}{2}\right)^2 \quad (5-2)$$

หากนำจุดปลาย $(0,0)$ หรือ $(T,0)$ แทนค่าลงในสมการ (5-2) จะให้ผลเหมือนกันคือ

$$S_m p = \frac{T^2}{16} \quad (5-3)$$

ให้ A คือ พื้นที่ใต้กราฟของรูป ดังนั้น จากสมการที่ (5-2) จะได้

$$\begin{aligned} A &= \int_0^T S dt = \int_0^T S_m dt - \frac{1}{4p} \int_0^T \left(t - \frac{T}{2}\right)^2 \\ &= S_m T - \frac{T^3}{48p} \end{aligned} \quad (5-4)$$

จากสมการ (5-3) และ (5-4) อาจหาค่า p ได้ว่า

$$p = \frac{T^3}{24A} \quad (5-5)$$

จากสมการ(5-3) และ (5-5) อาจหาค่า S_m ได้ว่า

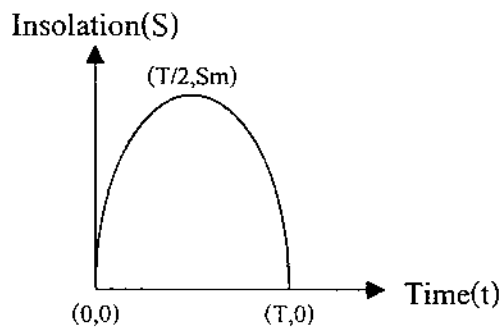
$$S_m = \frac{3}{2} \left(\frac{A}{T}\right) \quad (5-6)$$

เมื่อแทนค่า p และ S_m ลงในสมการ (5-2) เราอาจหาค่าความเข้มแสง S สัมพันธ์กับเวลา t ได้ดังสมการ

$$S = \frac{3}{2} \left(\frac{A}{T} \right) - \frac{6A}{T^3} \left(t - \frac{T}{2} \right)^2 \quad (5-7)$$

งานวิจัยนี้พิจารณากรณีของประเทศไทย ในหนึ่งวันดวงอาทิตย์สาดแสงเข้าพองจะใช้ประโยชน์ได้ทั้งหมด 8 ชั่วโมง ระหว่างเวลา 08.00-16.00 น. โดยมีพื้นที่ได้กราฟ A เท่ากับ $5,000 \text{ w.hr/m}^2/\text{day}$ ดังนั้น $T = 8 \text{ hr}$. ดังนั้นจากสมการที่ (5-7) จึงได้ความสัมพันธ์

$$S = 937.5 - 58.59(t - 4)^2 \quad (5-8)$$



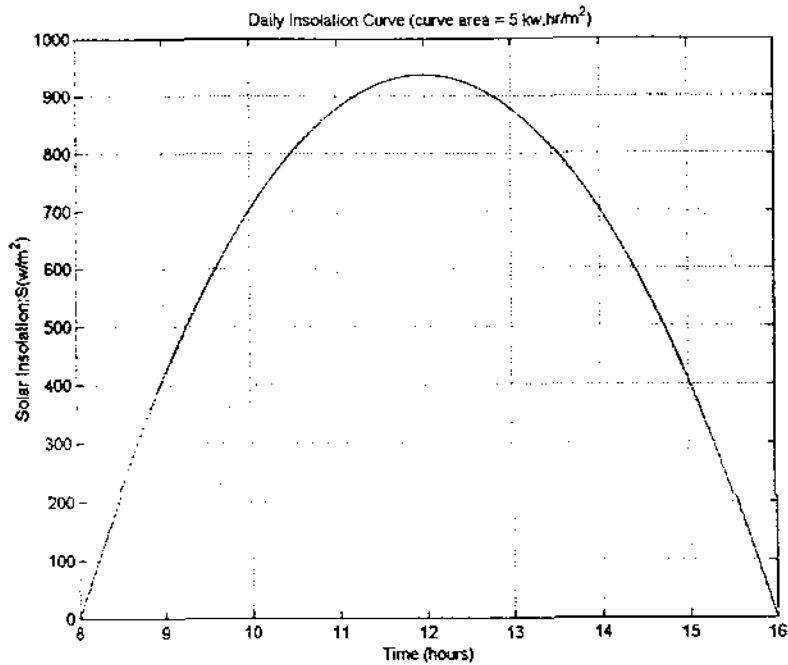
รูปที่ 5.1 กราฟพาราโบลาคว่ำใช้อธิบายความเข้มแสงอาทิตย์

เมื่อนำสมการ (5-8) ไปพล็อตกราฟสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับเวลา จะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 5.2

5.3 การจัดอุปกรณ์ในระบบ

อ้างถึงโครงสร้างของระบบตามรูปที่ 4.9 การออกแบบระบบในขั้นต้นจะต้องคำนึงถึงสภาพภูมิศาสตร์ตามความจริงของประเทศไทย ที่มีแสงอาทิตย์มาตลอดทั้งปี อีกทั้งความเข้มแสงอาทิตย์ในรอบปีค่อนข้างสม่ำเสมอ จากข้อมูลดาวเทียม GMS 4 และ GMS 5¹ ในการ

¹ แผนที่ศึกษาภาพหลังงานแสงอาทิตย์จากข้อมูลดาวเทียมสำหรับประเทศไทย (Solar Radiation Map of Thailand) โดยกรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงานร่วมกับภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร



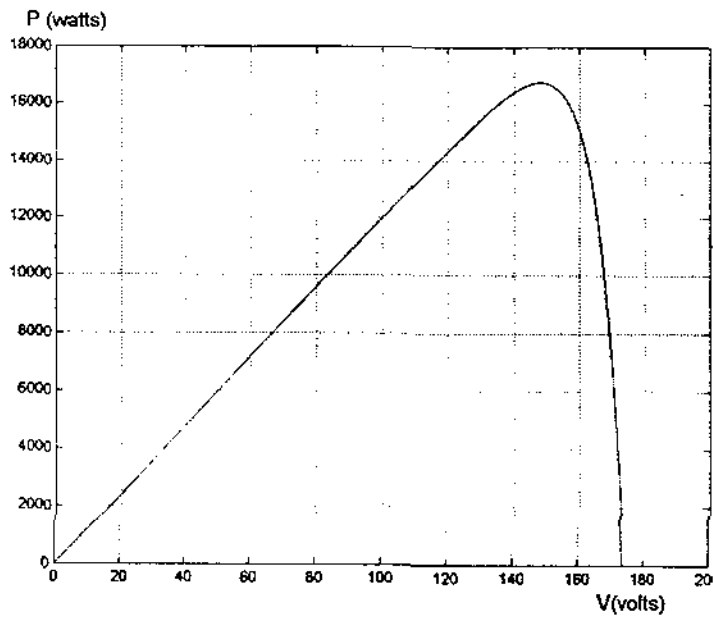
รูปที่ 5.2 กราฟพาราโบลาใช้อธิบายความเข้มแสงช่วงเวลากลางวัน (08.00-16.00 น.)

จัดทำแผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศไทย ซึ่งเก็บข้อมูลตั้งแต่เดือนมกราคม 1993 ถึง ธันวาคม 1998 จำนวน 6 ปี พบว่าค่าเฉลี่ยของความเข้มแสงอาทิตย์ทั่วประเทศจากทุกพื้นที่ จะมีค่าเท่ากับ $18.2 \text{ MJ}/m^2/\text{day}$ หรือเท่ากับ $5.06 \text{ kw.hr}/m^2/\text{day}$ ($1 \text{ kw.hr} = 3.6 \text{ MJ}$) เพื่อง่ายต่อการนำไปใช้งาน จึงให้มีค่าเท่ากับ $5 \text{ kw.hr}/m^2/\text{day}$ ในการพิจารณาถึงการออกแบบจำนวนของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในทางปฏิบัติ จะถือว่าใน 1 วัน (24 ชั่วโมง) จะมีเพียงแค่ 5 ชั่วโมงเท่านั้นที่ได้รับพลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยมีค่าความเข้มแสง (Insolation) เท่ากับ $1,000 \text{ w}/m^2$ (peak power) ตลอดทั้ง 5 ชั่วโมง ซึ่งเป็นการพิจารณาในสภาวะคงตัว ในงานวิจัยนี้มีความต้องการว่าระบบต้องสามารถทำงานได้อย่างอิสระตลอด 24 ชั่วโมง ซึ่งถือเป็นกรณีเลวร้ายที่สุดในทางปฏิบัติที่อาจเกิดขึ้นได้เช่น การรักษาผู้ป่วยในท้องถิ่นห่างไกลที่ไม่มีไฟฟ้าจากสายเมน จำเป็นต้องใช้ไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานแสงอาทิตย์ป้อนเครื่องมือแพทย์ แต่ในวันดำเนินการนั้นแสงอาทิตย์มีความเข้มไม่เพียงพอตลอดวัน กรณีเช่นนี้ มอเตอร์กับปั๊มน้ำที่พิจารณาในงานวิจัยนี้จึงเป็นโหลดจําลองนั่นเอง

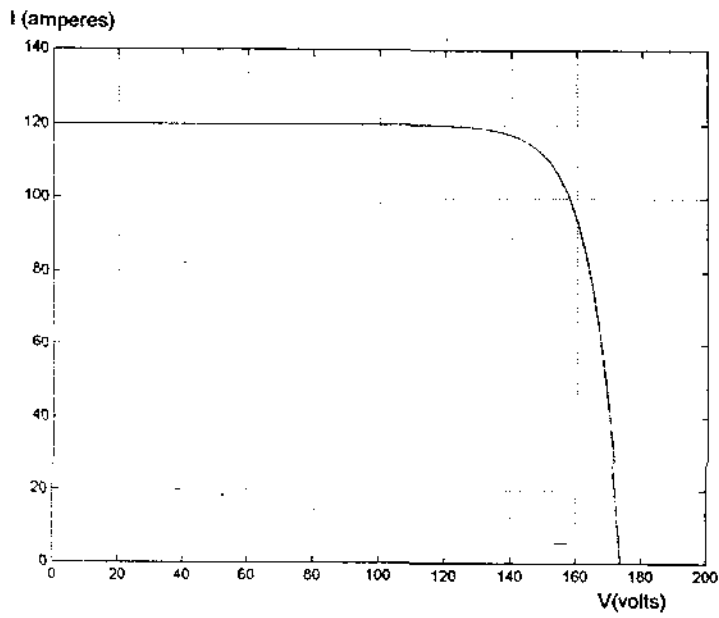
ในการออกแบบจำนวนของแผงเซลล์แสงอาทิตย์และแบตเตอรี่ให้เหมาะสมนั้นจะต้องนำเซลล์แสงอาทิตย์ แบตเตอรี่ และมอเตอร์ที่มีโหลดเป็นปั๊มน้ำ มาพิจารณาควควบคู่ไปพร้อมกัน ในการออกแบบจะต้องให้มีจำนวนของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพียงพอ ที่จะผลิตพลังงานไฟฟ้า เพื่อจะนำไปชาร์จแบตเตอรี่ให้เต็มภายในระยะเวลา 5 ชั่วโมงที่มีแสง (แบตเตอรี่อยู่ในสภาวะชาร์จอย่างเดียว) และยังคงนำพลังงานส่วนหนึ่งไปจ่ายให้แก่มอเตอร์ให้ทำงานได้ภายใน 5 ชั่วโมงที่มีแสงนี้ด้วย ส่วนอีก 19 ชั่วโมงที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ไม่สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ ก็จะเป็นหน้าที่ของแบตเตอรี่ที่จะต้องจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้แก่มอเตอร์ (แบตเตอรี่อยู่ในสภาวะดิสชาร์จอย่างเดียว) ทั้งนี้แบตเตอรี่จะต้องมีพลังงานเพียงพอที่จะดิสชาร์จได้ถึง 19 ชั่วโมง จึงจะทำให้มอเตอร์ทำงานได้ตลอด 24 ชั่วโมง การวินิจฉัยถึงจำนวนแบตเตอรี่และแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ที่อธิบายในย่อหน้าถัดไปอาจดูว่ามีจำนวนมาก ที่เป็นดังนี้เพราะเรามีข้อสมมุติทางวิศวกรรมถึงกรณีที่เลวร้ายที่สุด ดังที่ได้กล่าวแล้วว่าเป็นกรณีของวันฟ้าปิดตลอดทั้งวัน ระบบจะต้องทำงานได้โดยดึงไฟฟ้าจากแบตเตอรี่สำรองเท่านั้น เพื่อให้ดำเนินงานได้ 24 ชั่วโมง

ดังนั้นจากการพิจารณาโดยรวมแล้วมอเตอร์จะทำงานได้ตลอดทั้งวันจะต้องใช้เซลล์แสงอาทิตย์ทั้งหมด 200 โมดูล (โมดูลหนึ่งประกอบด้วยเซลล์ทั้งหมด 36 เซลล์ต่ออนุกรมกัน) จำนวนโมดูลที่อนุกรมในแต่ละแผง (string or array) เท่ากับ 8 ($n_s = 8 \times 36$) และมีจำนวน โมดูลที่ขนานในแต่ละแผงเท่ากับ 25 ($n_p = 25$) ซึ่งเราอาจคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ได้ความสัมพันธ์ของ (V, P), (V, I) และ (I, P) ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อใช้เซลล์แสงอาทิตย์ทั้งหมด 200 โมดูล ซึ่ง $n_s = 8 \times 36$ และ $n_p = 25$ โดยพิจารณาที่ความเข้มแสง $1,000 \text{ w/m}^2$ แสดงได้ดังกราฟในรูปที่ 5.3-5.5

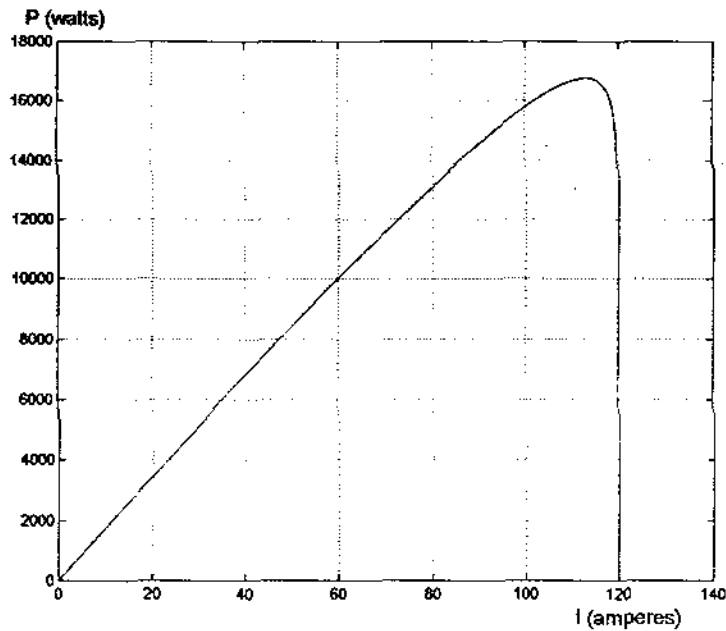
จากการคำนวณด้วยโปรแกรมจะได้ค่า $V_{pmax} = 148.09 \text{ V}$, $I_{pmax} = 113.21 \text{ A}$ ดังนั้นจึงคำนวณหา P_{max} ได้เท่ากับ 16.765 kW ซึ่งจะสอดคล้องกับรูปกราฟ (V, P), (V, I) และ (I, P) ดังรูปที่ 5.3-5.5 จะสังเกตเห็นว่าแรงดันที่ทำให้เกิดกำลังสูงสุดที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (148.09V) มีความพอเพียงที่จะใช้ในการป้อนให้แก่มอเตอร์ขนาดพิกัด 110 V และเพียงพอที่จะใช้ในการชาร์จแบตเตอรี่จำนวนหลายสิบลูกได้ในคราวเดียวกัน ในการคำนวณหาจำนวนของแบตเตอรี่นั้น เนื่องจากเราทราบค่าพิกัดแรงดันของมอเตอร์เป็นที่แน่นอนแล้ว อันดับแรกจึงต้องทำการคำนวณหาจำนวนลูกของแบตเตอรี่ที่อนุกรมในแต่ละแถวเสียก่อน ค่าแรงดันที่ได้จากการออกแบบจำนวนลูกของแบตเตอรี่ที่อนุกรมในแต่ละแถว จะต้องเพียงพอที่จะจ่ายกำลังให้แก่มอเตอร์ขนาดพิกัด 110 V ซึ่งจากการพิจารณาจะได้จำนวนลูกของแบตเตอรี่ที่อนุกรมในแต่ละแผงเท่ากับ 10 ลูก เพราะจะทำให้แบตเตอรี่มีแรงดันปกติเป็น 120 V โดยมีค่าช่วงแรงดัน



รูปที่ 5.3 ลักษณะสมบัติ (P,V) ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 200 โมดูล



รูปที่ 5.4 ลักษณะสมบัติ (I,V) ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 200 โมดูล

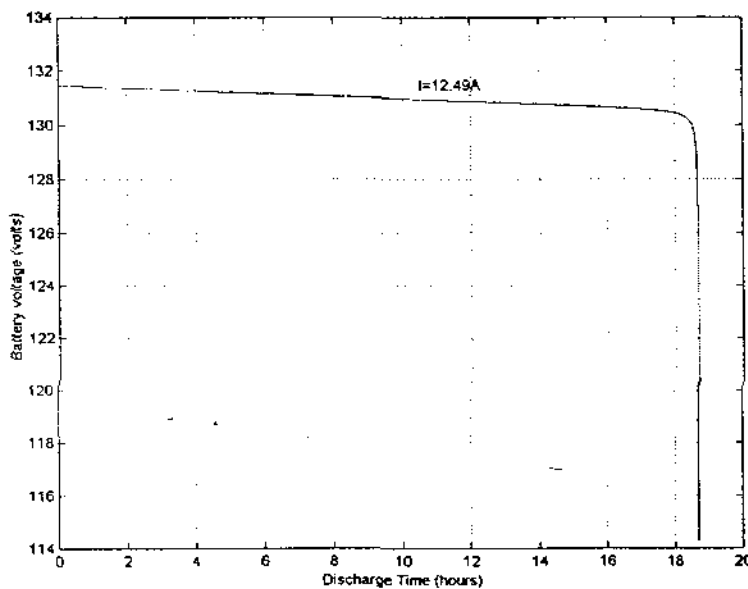


รูปที่ 5.5 ลักษณะสมบัติ (P,I) ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 200 โมดูล

ที่สภาวะดิซชาร์จประกอบด้วยแรงดันสูงสุดที่ 133 V แรงดันต่ำสุดที่ 115 V (แบตเตอรี่ 1 ลูก มีแรงดันปกติ 12 V มีค่าช่วงแรงดันที่สภาวะดิซชาร์จประกอบด้วยแรงดันสูงสุดที่ 13.3 V แรงดันต่ำสุดที่ 11.5 V) ซึ่งเพียงพอในการจ่ายให้แก่มอเตอร์ที่ค่าพิกัด จากนั้นจึงทำการคำนวณหาจำนวนแอมป์ที่ต่อขนานกันของแบตเตอรี่ เนื่องจากเราทราบค่ากระแสของมอเตอร์ที่ต้องการเมื่อพิจารณากำลังงานสูญเสียต่างๆ ให้ลดลงจนเหลือน้อยที่สุดแล้ว กระแสที่มอเตอร์ต้องการมีค่าคงที่ตลอดเท่ากับ 12.49 A ซึ่งการออกแบบจำนวนแอมป์ที่ต่อขนานกันของแบตเตอรี่ จะต้องพิจารณาถึงระยะเวลาที่ใช้ในการดิซชาร์จหรือจ่ายกำลังให้แก่มอเตอร์ ในการนี้แบตเตอรี่จะต้องมีพลังงานเพียงพอที่จะจ่ายกำลังได้ตลอดช่วงระยะเวลาที่ไม่มีแสง ซึ่งใน 1 วัน หากเรากำหนดให้มีแสง 8 ชั่วโมง (08.00-16.00 น.) เราจึงทราบช่วงระยะเวลาที่ไม่มีแสงว่าเป็น 16 ชั่วโมง แต่หากกำหนดให้มีแสงเพียง 5 ชั่วโมง ช่วงระยะเวลาที่ไม่มีแสงก็จะเป็น 19 ชั่วโมง ดังนั้นแบตเตอรี่จะต้องมีพลังงานเพียงพอที่จะจ่ายกำลังได้อย่างต่อเนื่องประมาณ 16-19 ชั่วโมงที่ไม่มีแสงนี้

แบตเตอรี่ที่นำมาพิจารณา จะยังคงเป็นชนิดเดียวกันกับที่ได้กล่าวมาแล้ว โดยมีค่าแรงดันปกติต่อ 1 ลูกเท่ากับ 12 V ค่าความจุพิกัด 70 Ah และมีค่าความต้านทานภายในรวม (R_{tot}) ขณะดิซชาร์จเท่ากับ $6.15 \times 10^{-2} \Omega$ โดยจากที่ผ่านมาข้างต้น เราทราบจำนวนลูกของแบตเตอรี่ที่

อนุกรมในแต่ละแถวแล้วว่ามี 10 ลูก ดังนั้น ถ้าเราออกแบบให้จำนวนแถวที่ต่อขนานกันของแบตเตอรี่มี N_{bp} จะได้ค่าความต้านทานภายในรวมขณะดิสชาร์จกลายเป็น $(10/N_{bp}) * 6.15E-2 \Omega$ และค่าความจุพิทก็กลายเป็น $N_{bp} * 70 \text{ Ah}$ ซึ่งจากการคำนวณซ้ำๆ ด้วยโปรแกรมเพื่อหาผลเฉลย จะได้จำนวนแถวที่ต่อขนานกันของแบตเตอรี่ที่เหมาะสมเป็น 5 แถว หรือ string โดยจะได้รับความสัมพันธ์ของแรงดันที่ขั้วของแบตเตอรี่ขณะดิสชาร์จ (V_d) เทียบกับเวลาเมื่อใช้แบตเตอรี่ทั้งหมด 50 ลูก (แบ่งเป็นจำนวนลูกที่อนุกรมในแต่ละแถวเท่ากับ 10 ลูก และจำนวนแถวที่ต่อขนานกันของแบตเตอรี่เท่ากับ 5) แสดงได้ดังรูปที่ 5.6 จากรูปกราฟการดิสชาร์จของแบตเตอรี่จะสังเกตเห็นว่าแบตเตอรี่สามารถดิสชาร์จให้แก่มอเตอร์เพียงพอกเกินกว่า 16 ชั่วโมงที่ไม่มีแสงอย่างใดก็ตาม การใช้แบตเตอรี่จำนวนมากที่ต่อผสมเช่นนี้ ในทางปฏิบัติต้องการวงจรจัดแบ่งกระแส (charge equalizers) ให้แบตเตอรี่แต่ละลูกจ่ายกระแสได้เท่าๆ กัน อนึ่ง หากเรากำหนดความต้องการใช้ระบบอย่างอิสระด้วยจำนวนชั่วโมงที่น้อยลง เช่น 5 ชั่วโมง จำนวนแบตเตอรี่ที่ใช้ก็น้อยลงด้วย อย่างในกรณี 5 ชั่วโมงนี้ จะใช้แบตเตอรี่ชุดหลักเพียง 10 ลูก และอาจจัดให้มีแบตเตอรี่สำรองอีก 10 ลูก จำนวนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะลดลงเหลือเพียง 90-95 โมดูลเท่านั้น



รูปที่ 5.6 กราฟการคายประจุของแบตเตอรี่

การใช้งานแบตเตอรี่จะต้องคำนึงถึงการชาร์จด้วย อัตรากระแสในการชาร์จแบตเตอรี่คิดเป็นลูกๆในแต่ละแถวของช่วง CCC (constant current charge) ที่พอเหมาะเท่ากับ 16 A และอัตรากระแสดังกล่าวลดลงแบบเอ็กซ์โปเนนเชียลในช่วง CVC (constant voltage charge) เท่ากับ $16 \cdot \exp(-t)$ ซึ่งแบตเตอรี่หนึ่งแถวจะใช้เวลาในการชาร์จทั้งสิ้น 4.79 ชั่วโมง โดยใช้เวลาในการชาร์จช่วง CCC เท่ากับ 0.79 ชั่วโมง และใช้เวลาในการชาร์จช่วง CVC เท่ากับ 4 ชั่วโมง การชาร์จแบตเตอรี่ทั้ง 5 แถวนั้น ไม่มีความจำเป็นต้องรอค่าความเข้มแสงอาทิตย์ให้เพียงพอพร้อมกันทั้ง 5 แถวก่อนแล้วค่อยชาร์จ แต่จะทำการชาร์จแบตเตอรี่เป็นลำดับที่ละแถวตามค่าความเข้มแสงที่เป็นจริง ในทางปฏิบัติเราอาจตรวจรับรู้ระดับของความเข้มแสง ได้ด้วยการวัดกระแสและแรงดันเอาต์พุตจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งเมื่อความเข้มแสงเพียงพอต่อแบตเตอรี่หนึ่งแถวแล้วก็ทำการชาร์จได้ทันทีและจะทำการชาร์จแถวต่อไป เมื่อความเข้มแสงมากขึ้นเพียงพอตามลำดับ

นอกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์และแบตเตอรี่แล้ว อุปกรณ์ที่สำคัญในระบบที่ได้กล่าวถึงในรายละเอียดไปแล้วในบทที่ 2 ก็คือ โหลดที่เป็นมอเตอร์และปั๊มน้ำ ซึ่งจะไม่ขอกล่าวซ้ำอีก ในงานจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์ได้พิจารณาว่า คอนเวอร์เตอร์ ตัวควบคุม MPPT และ อุปกรณ์จำกัดกระแสสำหรับแบตเตอรี่ ทั้งในสถานะการชาร์จและดิสชาร์จมีการดำเนินงานโดยสมบูรณ์แบบ ซึ่งอาจพิจารณาว่าเป็นเสมือนเกน (gain) ในระบบ การจำลองผลมีความสำคัญต่องานวิจัยนี้ เนื่องจากได้ใช้เพื่อศึกษาและออกแบบตัวควบคุม ใช้สำหรับทดสอบตัวควบคุมที่ออกแบบขึ้นอีกด้วย หัวข้อต่อไปเป็นการกล่าวถึงโครงสร้างของโปรแกรมจำลองผล

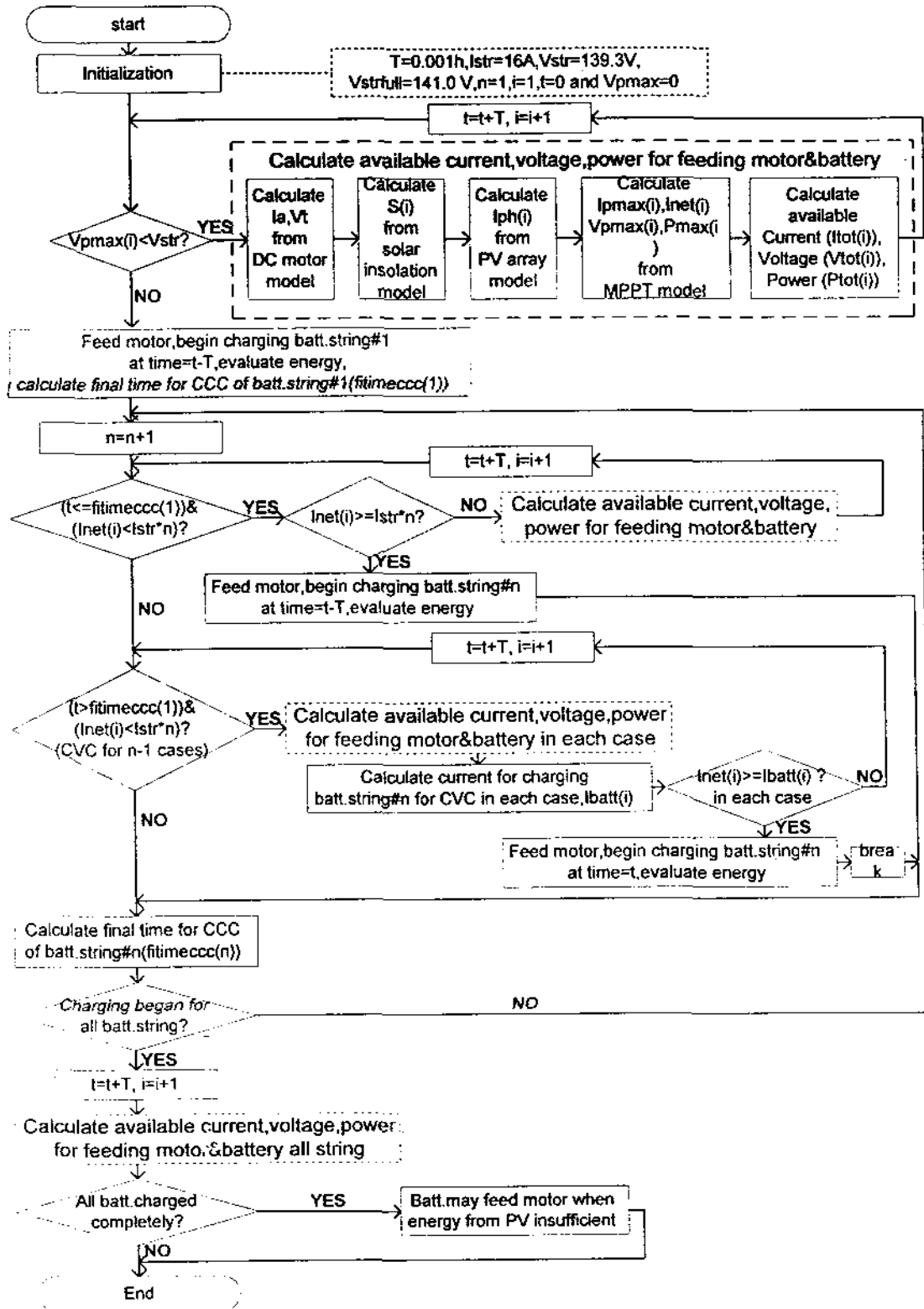
5.4 โครงสร้างของโปรแกรมจำลองผลระบบพลังงานแสงอาทิตย์

แผนภูมิดังรูปที่ 5.7 แสดงโครงสร้างของโปรแกรมจำลองผลระบบ โดยหลักใหญ่ประกอบไปด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุปกรณ์ต่างๆ ที่มีรายละเอียดปรากฏในบทที่ 2 ของรายงานนี้ - โปรแกรมจำลองผลเป็นการบูรณาการแบบจำลองพลวัตของอุปกรณ์ต่างๆ อย่างเป็นระบบ ให้สามารถดำเนินงานจำลองผลได้เพื่อศึกษาพลวัตพลังงาน ของระบบที่ศึกษาวิจัยอยู่เป็นเวลาตลอด 24 ชั่วโมง การทำงานของโปรแกรมอาจอธิบายได้ดังต่อไปนี้

ในขั้นต้น ที่เวลา $t=0$ ทำการกำหนดค่าตัวแปรเริ่มต้นต่างๆ เช่น กำหนดช่วงเวลาการจำลองผล (T) ในที่นี้กำหนดค่า T เท่ากับ 0.001 ชั่วโมง (หรือ 3.6 วินาที) และค่าพารามิเตอร์อื่นๆ ที่จำเป็น ซึ่งอาจดูรายละเอียดได้จากแผนภูมิ จากนั้นจึงทำการตรวจสอบว่าควรจ่ายพลังงานด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์หรือแบตเตอรี่ ด้วยเงื่อนไขที่เหมาะสมโปรแกรมจะคำนวณตามแบบ

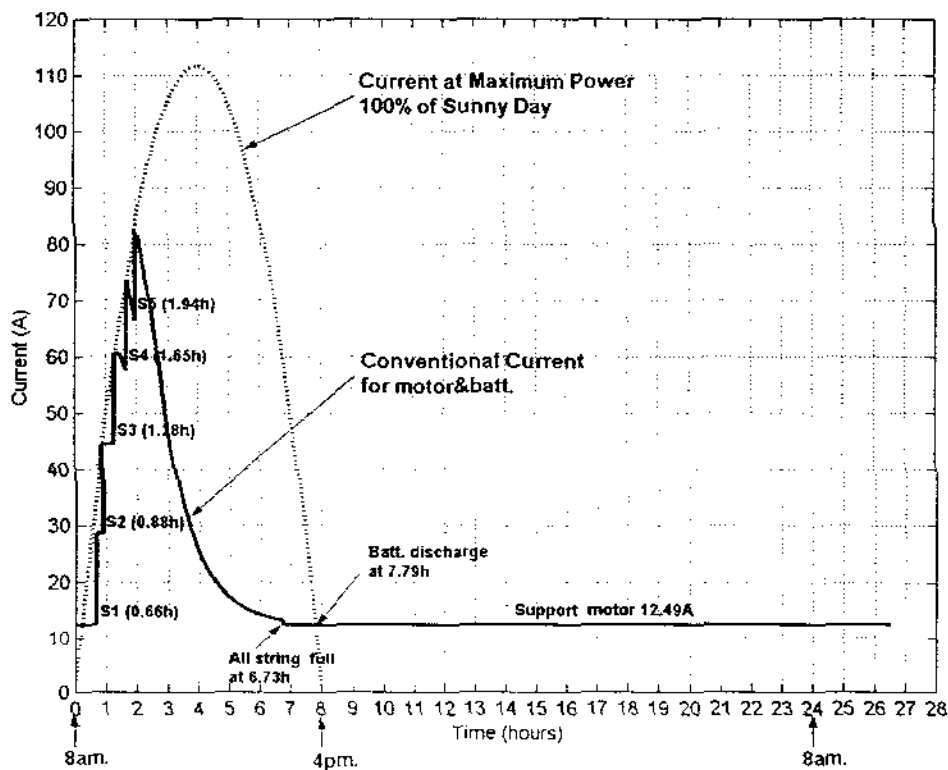
จำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อหากระแส แรงดัน และกำลังที่เกี่ยวข้อง ซึ่งเป็นกระบวนการทำงานที่ล้อมรอบด้วยเส้นประโนแผนภูมิ และโนแผนภูมินี้หากปรากฏกระบวนการที่ล้อมรอบเป็นเส้นประ ก็จะหมายถึงกระบวนการคำนวณเช่นเดียวกันนี้ทั้งสิ้น ซึ่งในขั้นตอนนี้จะมีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุปกรณ์ต่างๆ มาพิจารณาร่วมอยู่ด้วย ได้แก่ แบบจำลองของมอเตอร์ แบบจำลองแสง $S(i)$ ของดวงอาทิตย์ แบบจำลองกระแสโฟโต $I_{ph}(i)$ ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ แบบจำลองกระแสที่ทำให้เกิดกำลังสูงสุด $I_{pmax}(i)$ ของตัวควบคุมตามรอยกำลังงานสูงสุด โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุปกรณ์ต่างๆ เหล่านี้ จะถูกนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าของ $I_{net}(i)$ จากนั้นทำการทดสอบว่า ปริมาณ I_{net} ตัวที่ i ($I_{net}(i)$) มีความเพียงพอที่จะใช้ในการเริ่มชาร์จแบตเตอรี่แถวที่ 1 หรือไม่ ทั้งนี้กระแสที่ใช้ในการเริ่มชาร์จแบตเตอรี่แถวแรก (I_{str}) จะต้องมีค่าเท่ากับ $16 A$ ($I_{str}=16$)

ขั้นถัดมา เป็นการชาร์จแบตเตอรี่ ตั้งแต่แถวที่ 2 ขึ้นไปจนถึงแถวสุดท้าย ซึ่งทุกแถวในขั้นตอนนี้ จะมีอัลกอริทึมในการชาร์จที่คล้ายกัน โดยเวลาที่ใช้ในการเริ่มชาร์จ จะมีความเป็นไปได้แบ่งออกเป็น 2 ช่วงเวลาใหญ่ๆ ได้แก่ ช่วงที่ 1 เริ่มชาร์จในช่วงเวลาที่แบตเตอรี่ก่อนหน้าแถวที่กำลังพิจารณา ยังชาร์จอยู่ในช่วง CCC ครบทั้งหมดทุกแถว และช่วงที่ 2 เริ่มชาร์จในช่วงเวลาที่แบตเตอรี่ก่อนหน้าแถวที่กำลังพิจารณา ชาร์จอยู่ในช่วง CVC บ้างแล้วบางแถว หรือชาร์จอยู่ในช่วง CVC ทั้งหมดทุกแถว การพิจารณาการชาร์จแบตเตอรี่ในช่วงที่ 1 นี้ จะมีอัลกอริทึมในการพิจารณาเหมือนๆ กับการพิจารณาการชาร์จแบตเตอรี่แถวที่ 1 ข้างต้น ส่วนการพิจารณาการชาร์จแบตเตอรี่ในช่วงที่ 2 จะพิจารณาช่วงเวลาที่เป็นไปได้ในการเริ่มชาร์จแบ่งออกเป็นช่วงย่อยๆ ละเอียดลงไปอีก โดยจำนวนช่วงเวลาที่แบ่งออกเป็นช่วงย่อยๆ จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามการพิจารณาแบตเตอรี่แถวที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งในแต่ละช่วงเวลาที่แบ่งออกเป็นช่วงย่อยๆ นี้ ระดับกระแสที่แบตเตอรี่จะใช้ในการชาร์จในแต่ละดัชนี i ($I_{bat}(i)$) จะมีค่าลดลงแบบเอ็กซ์โปเนนเชียลที่แตกต่างกันออกไปในแต่ละช่วงเวลาด้วย ส่วนอัลกอริทึมในการพิจารณายังใช้หลักการคล้ายๆ กับช่วง CCC เพียงแต่ในช่วง CVC นี้ อัตรากระแสที่แบตเตอรี่จะใช้ในการชาร์จจะมีการลดลงแบบเอ็กซ์โปเนนเชียลแล้วเท่านั้นเอง คำอธิบายตัวแปรที่เกี่ยวข้องและรายละเอียดตัวโปรแกรมจำลองผลที่พัฒนาขึ้นด้วย MATLAB™ อาจหาได้จาก [23]



รูปที่ 5.7 แผนภูมิของโปรแกรมจำลองผลระบบพลังงานแสงอาทิตย์

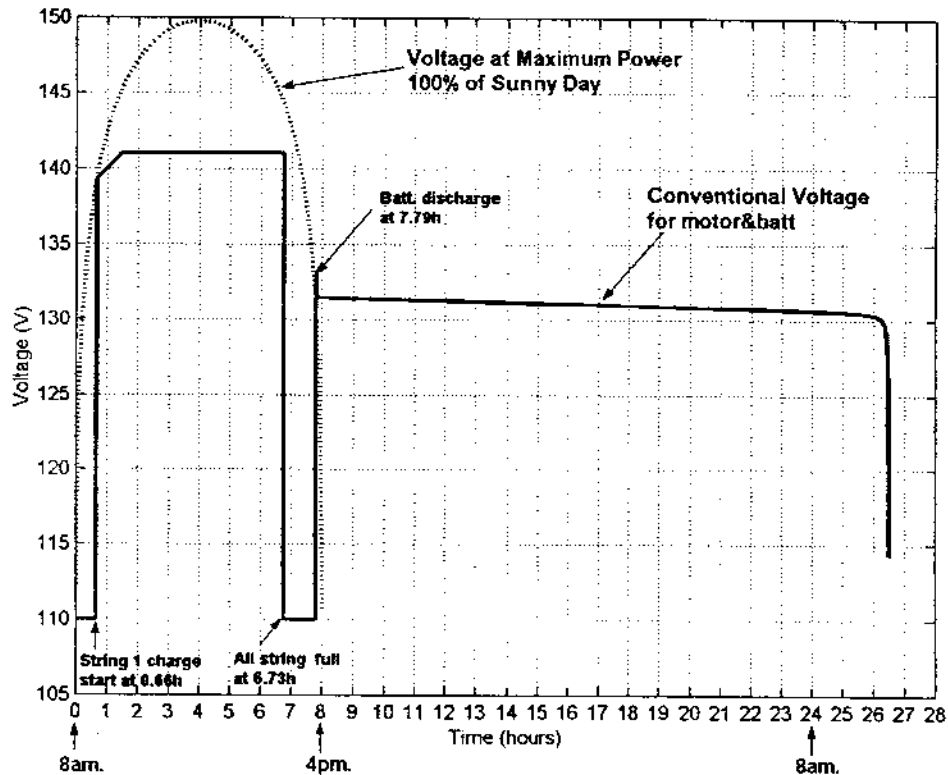
การคำนวณงานจำลองผลในกรณีที่มีความเข้มแสงอาทิตย์เป็น 100 % หรือที่เรียกว่าเป็น วันฟ้าเปิด ให้ผลการคำนวณงานสำหรับ 24 ชั่วโมงดังที่แสดงด้วยรูปที่ 5.8 รูปที่ 5.8 แสดงปริมาณกระแสที่ใช้ในระบบด้วยเส้นสีดำที่บ ั ชั่วโมงที่ 0 ตรงกับ 08.00 น. และชั่วโมงที่ 24 ตรงกับ 08.00 น. ของวันใหม่ เส้นประที่มีรูปโค้งแบบพาราโบลานั้นแสดงปริมาณกระแส ที่อาจดึงมาใช้ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ตั้งแต่เวลา 08.00 น. จนถึง 16.00 น. เมื่อพิจารณา เส้นกราฟของกระแสสีดำที่บ ั จะเห็นว่า ณ เวลาที่ผ่านไป 0.66 ชั่วโมงหรือเป็นเวลา 08.40 น. แบตเตอรี่แถวที่ 1 (string S1) ถูกสับเข้ารับการชาร์จ กระแสเดิมที่จ่ายให้มอเตอร์แต่เพียงอย่าง



รูปที่ 5.8 ผลของโปรแกรมจำลองผลแสดงปริมาณกระแสตลอด 24 ชั่วโมง

เดียวด้วยปริมาณ 12.49 A กระโดดขึ้นเป็น 28.49 A เมื่อเวลาผ่านไปเพียงไม่กี่นาที คือที่เวลา 08.53 น. แบตเตอรี่แถวที่ 2 ก็ถูกนำเข้ามาชาร์จ และเป็นเช่นนี้สำหรับแบตเตอรี่แถวที่ 3 4 และ 5 ไปตามลำดับ ลักษณะของเส้นกราฟเป็นแบบคงที่และลดลงค่อนข้างรวดเร็ว สอดคล้องกับช่วงการชาร์จแบบ CCC และ CVC ตามลำดับ การชาร์จแบตเตอรี่ทั้ง 5 แถวกระทำ ได้โดยสมบูรณ์เมื่อเวลาเกือบ 15.00 น. จากนั้นไปจนถึงเกือบจะ 16.00 น. กระแส 12.49 A ถูก

ตั้งจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไปจ่ายให้แก่มอเตอร์เท่านั้น เมื่อเวลาใกล้ 16.00 น. แสงอาทิตย์จะอ่อนลงมากจนไม่อาจใช้พลังงานที่แปลงมาได้เพียงพอ แผงเซลล์แสงอาทิตย์จึงถูกปลดออกจากจุดจ่ายพลังงาน แต่แบตเตอรี่จะถูกดึงเข้ามาแทนที่เพื่อทำการจ่ายกระแสแก่มอเตอร์ต่อไปตลอดช่วงเวลากลางคืนและค่ำ ซึ่งเป็นดังนี้เรื่อยไปทุกวัน รูปลักษณะของแรงดันไฟฟ้าที่สอดคล้องกันตลอด 24 ชั่วโมง จะเป็นดังรูปที่ 5.9 เส้นประรูปพาราโบลาแสดง

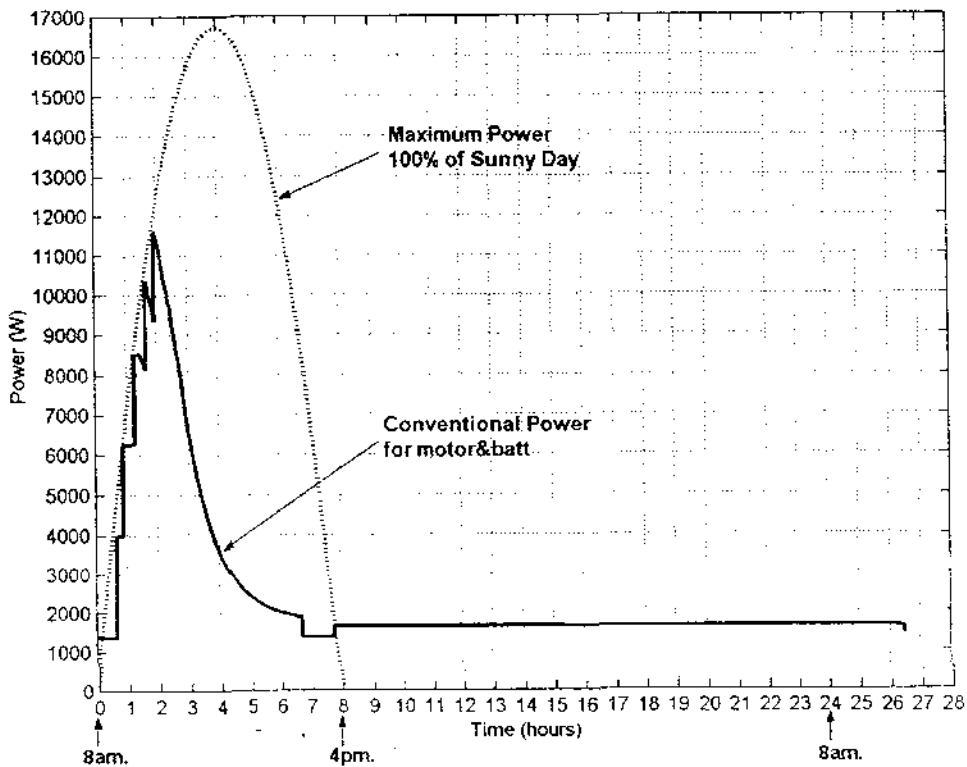


รูปที่ 5.9 ผลของโปรแกรมจำลองผลแสดงปริมาณแรงดันตลอด 24 ชั่วโมง

แรงดันที่อาจใช้ประโยชน์ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ในช่วงเวลา 08.00 น. ถึง เกือบ 09.00 น. และ 14 น. เศษ ไปจนถึงเกือบจะ 16.00 น. การใช้แรงดันมีความต้องการเพียง 110 V สำหรับจ่ายให้มอเตอร์ ส่วนในช่วงกลางวันที่แดดแรงมีการใช้แรงดันทั้งเพื่อการชาร์จแบตเตอรี่และจ่ายให้มอเตอร์ ลักษณะรูปคลื่นของแรงดันจึงสะท้อนให้เห็นวงจรของการชาร์จแบตเตอรี่แบบ CCC และตามด้วย CVC เมื่อแดดเริ่มอ่อนใกล้เวลา 16.00 น. แบตเตอรี่จึงมีบทบาทต่อการจ่ายพลังงานแก่โหลด ดังอาจสังเกตได้จากรูปคลื่นของแรงดันที่สอดคล้องกับ ลักษณะสมบัติการดิซชาร์จของแบตเตอรี่ ซึ่งแบตเตอรี่ทั้งหมดให้แรงดันสูงเกิน 110 V การขับมอเตอร์จึงต้องพึ่งพาวงจรสับไฟฟ้าหรือวงจรชอปเปอร์ (chopper) ทำหน้าที่

ควบคุมแรงดันกระแสตรงให้คงที่ รูปคลื่นของกำลังไฟฟ้างรูปที่ 5.10 ได้มาจากการนำกระแสและแรงดันคูณกัน จุดที่น่าสนใจอยู่ที่ช่วงกลางวันที่แคบแรง ในระบบมีกำลังไฟฟ้าอยู่อย่างเหลือเฟือเพื่อที่จะสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ อย่างไรก็ตาม กรณีที่นำเสนออยู่นี้อาจถือได้ว่าเป็นกรณีอุดมคติของการมีความเข้มแสงอาทิตย์ 100 %

โปรแกรมจำลองผลที่ได้นำเสนอในบทนี้ จะได้รับการนำไปจำลองผลเพื่อศึกษากรณีต่างๆที่สมจริงมากขึ้นของความเข้มแสงอาทิตย์ ผลที่ได้จากการจำลองได้รับการนำเสนอไว้ในบทต่อไป ซึ่งเป็นประโยชน์มากต่อการพิจารณาออกแบบตัวควบคุมการจัดการใช้พลังงาน



รูปที่ 5.10 ผลของโปรแกรมจำลองผลแสดงกำลังไฟฟ้าตลอด 24 ชั่วโมง

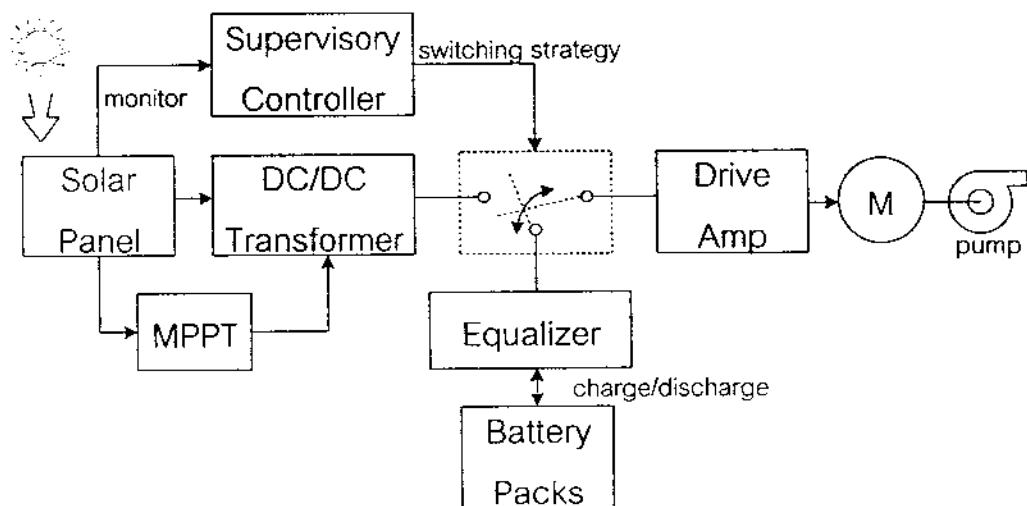
บทที่ 6

การควบคุมแบบกำกับสั่งการเพื่อจัดการพลังงาน

6.1 กล่าวนำ

การดำเนินงานวิจัยที่ได้รายงานผลผ่านมา ในด้านการทำออปติไมเซชันของการใช้พลังงาน อยู่ในส่วนที่สามารถดำเนินการตามแบบแผนโดยอาศัยแคลคูลัสได้ ซึ่งงานที่ผ่านมาได้พิจารณาการถ่ายโอนกำลังสูงสุดระหว่างแผงเซลล์แสงอาทิตย์กับส่วนประกอบต่าง ๆ ในระบบ และได้พิจารณาถึงการลดความสูญเสียในมอเตอร์ให้เหลือน้อยที่สุด

ความพยายามที่จะใช้พลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้ได้มากที่สุด ยังคงพอมิหนทางหากเราศึกษาพลวัตทางพลังงานของระบบอย่างละเอียด โดยอาศัยโปรแกรมจำลองผลดังที่ได้นำเสนอในบทที่ผ่านมา เมื่อมีความเข้าใจพลวัตทางพลังงานอย่างถ่องแท้แล้ว ความสามารถ



รูปที่ 6.1 โครงสร้างระบบพลังงานแสงอาทิตย์เมื่อปรากฏตัวควบคุมแบบกำกับสั่งการ

และความชาญฉลาดของมนุษย์ในการจัดการพลังงาน อาจได้รับการนำไปอนุวัติขึ้นเป็นตัวควบคุมการจัดการพลังงาน ตัวควบคุมที่อนุวัติขึ้นจากรากฐานความชาญฉลาดของมนุษย์นี้เราอาจเรียกว่า ตัวควบคุมแบบกำกับสั่งการ (supervisory controller) หรือตัวควบคุมชาญฉลาด (intelligent controller) ก็เรียก ระบบพลังงานแสงอาทิตย์ของงานวิจัยนี้เมื่อมีการใช้ตัวควบคุมแบบกำกับสั่งการ อาจแทนได้ด้วยแผนภาพดังรูปที่ 6.1 ตัวควบคุมทำหน้าที่เฝ้าตรวจสอบสถานะทาง

พลังงานเอาต์พุตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ แล้วดำเนินการตัดสินใจสั่งการสวิทช์ด้วย อินพุตงานให้แก่อุปกรณ์ต่าง ๆ อย่างเหมาะสม

เนื้อหาในบทที่ 6 ของรายงานจึงว่าด้วยเรื่อง การออกแบบและอนุวัตตัวควบคุมแบบกำกับสั่งการ ให้การนำเสนอผลการศึกษาวิเคราะห์พลวัตทางพลังงานของระบบ อันจะนำไปสู่การออกแบบตัวควบคุม พร้อมทั้งนำเสนอผลศึกษาการใช้งานตัวควบคุมดังกล่าวกับระบบพลังงานแสงอาทิตย์

6.2 ตัวควบคุมแบบกำกับสั่งการ

ระบบควบคุมแบบกำกับสั่งการ (supervisory control) เป็นระบบควบคุมที่มีตัวควบคุมให้การกำกับสั่งการดำเนินงาน ในทำนองที่คล้ายกับการสั่งการของมนุษย์ที่เป็นผู้ควบคุมการปฏิบัติ โครงสร้างของตัวควบคุมและเทคนิคในการออกแบบนั้นเปิดกว้าง ซึ่งอาจใช้เทคนิคแบบธรรมดาที่พึ่งพาสมาการดิฟเฟอเรนซ์ (difference equation) หรืออาจใช้เทคนิคทางปัญญาประดิษฐ์ (artificial intelligent) กับการพึ่งพาการจำลองผล ในงานวิจัยนี้ เลือกใช้ประการหลัง เพราะระบบมีความไม่เป็นเชิงเส้นอย่างมาก ปฏิสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบต่างๆในระบบ อาจทราบได้ก็ด้วยการจำลองผลเท่านั้น รูปลักษณะของตัวควบคุมเป็นชนิดตัวควบคุมชำนาญการ (expert controller) ที่มีองค์ประกอบหลักสองส่วนกล่าวคือ เครื่องอนุมาน (inference engine) และฐานความรู้ (knowledge base) เครื่องอนุมานในที่นี้ก็คือคอมพิวเตอร์ในรูปลักษณะใดๆนั่นเอง ส่วนฐานความรู้นั้นประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นข้อมูล (data base) และส่วนที่เป็นกฎ (rule base) ให้การตัดสินใจสั่งดำเนินงาน ที่มีรูปแบบเป็น

ถ้า.....แล้ว..... (if.....then.....)

ในทางปฏิบัติ ฐานความรู้จะถูกสร้างขึ้นด้วยซอฟต์แวร์ (software) ที่รวมองค์ประกอบทั้งข้อมูลและกฎเข้าด้วยกัน

ในงานวิจัยนี้ การออกแบบตัวควบคุมดำเนินการโดยตรง (direct method) ตามแนวฮิวริสติก (heuristic) ที่อาศัยการศึกษาวิเคราะห์ผลจากการจำลองสถานการณ์หรือจำลองผล การอนุมานกฎใช้ตรรกสองสถานะ ไม่ปรากฏความไม่แน่นอนใดๆ ที่ดำเนินการดังกล่าวนี้เพราะงานวิจัยนี้เป็นเพียงขั้นเริ่มต้น ของการแสวงหาหนทางการใช้พลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้ได้อย่างคุ้มค่า นอกจากนี้ ยังขอทบทวนเกี่ยวกับตัวควบคุมกำกับสั่งการชนิดชำนาญการไว้สั้น ๆ แต่เพียงเท่านี้ เนื่องจากรายละเอียดเพิ่มเติมอาจหาได้จากเอกสารอ้างอิง [30, 31] เป็นต้น

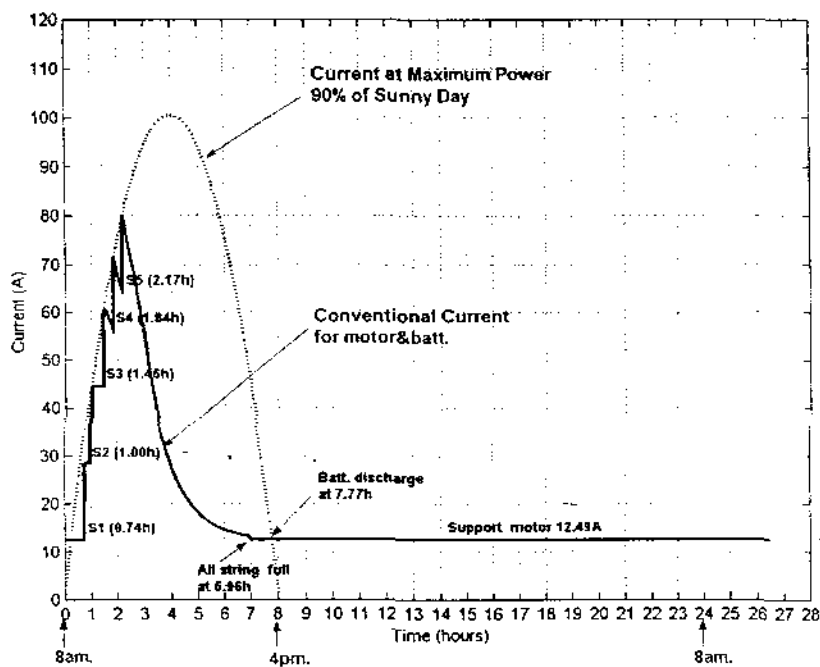
6.3 การศึกษาพลวัตทางพลังงานของระบบ

จากการจำลองผลบางส่วนที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 5 อาจสังเกตเห็นได้ว่า ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อการศึกษาการใช้ประโยชน์แผงเซลล์แสงอาทิตย์ คือ ความเข้มแสงอาทิตย์ ผลที่ได้แสดงไว้ในบทที่ 5 รูปที่ 5.8 – 5.10 เป็นของกรณีอุดมคติ กล่าวคือ ความเข้มแสงอาทิตย์ 100% หรือที่เรียกว่าเป็นวันฟ้าเปิด ซึ่งหมายถึง ไม่มีเมฆปกคลุมแสงอาทิตย์เลย ข้อสมมุติเช่นนี้ มีความเป็นไปได้กับภาคตะวันออกเฉียงเหนือในฤดูหนาวและฤดูร้อน อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์เชิงพลังงานในระบบจะต้องคำนึงถึงกรณีที่สมจริงด้วย กล่าวคือ แสงอาทิตย์ถูกบดบังจากกลุ่มเมฆ ในการศึกษานี้ได้สมมุติว่า แสงอาทิตย์มีความเข้มแสงคงที่ตลอดวัน (08.00 น. – 16.00 น.) ความเข้มแสงสูงสุดคือ 100% ขณะที่ 50% ถือเป็นความเข้มแสงต่ำสุดที่เป็นไปได้ เพราะความเข้มแสงที่ต่ำกว่า 50% อาจเกิดขึ้นได้น้อยมากเฉพาะในกรณีที่ที่มีพายุฝนเท่านั้น ในโอกาสอื่นคงแทบจะไม่มี อย่างไรก็ตาม โอกาสเช่นนี้อาจเกิดเป็นช่วงเวลานานดังเช่นฤดูมรสุมของทางภาคใต้ของประเทศ การศึกษาพลวัตทางพลังงานของระบบในงานวิจัยนี้ ดำเนินการ โดยอาศัยโปรแกรมจำลองผลที่พัฒนาขึ้น และได้ทำการปรับเปลี่ยนข้อมูลแบบจำลองความเข้มแสงอาทิตย์ให้้น้อยกว่า 100% ไปจนถึง 50% โดยลดลงทีละ 10% ตามลำดับ มีผลการศึกษาดังต่อไปนี้

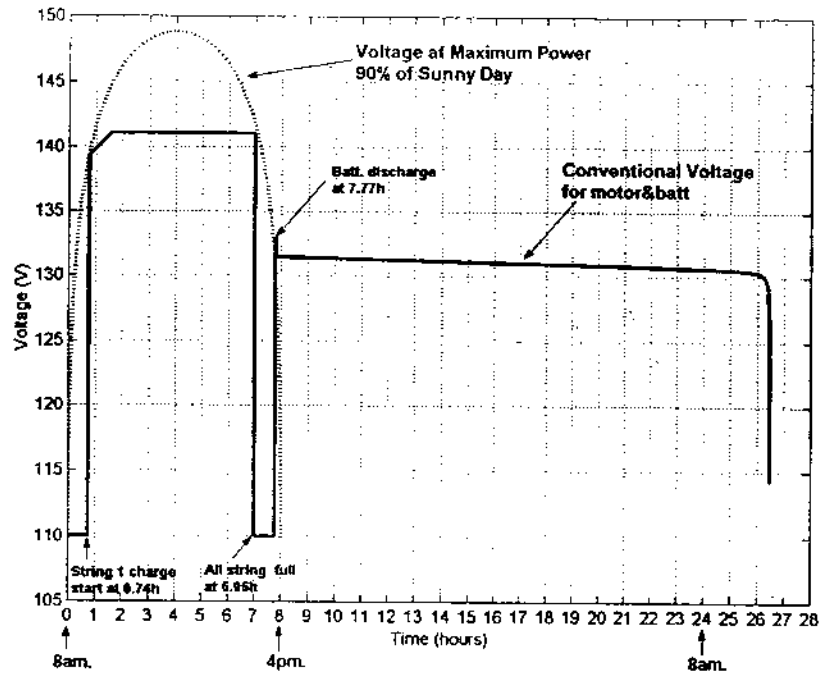
กรณีของความเข้มแสงอาทิตย์เป็น 100% จะไม่ขอกกล่าวซ้ำในรายละเอียด เพราะได้นำเสนอไว้แล้วในตอนท้ายของบทที่ 5 แต่อาจสรุปได้ว่า สามารถใช้พลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในการป้อนมอเตอร์ และชาร์จแบตเตอรี่ในช่วงเวลากลางวันได้อย่างเพียงพอ นั่นคือ แบตเตอรี่ทั้ง 5 แถว แถวละ 10 ลูก ชาร์จได้เสร็จสิ้นก่อนเวลา 16.00 น.

กรณีของความเข้มแสงอาทิตย์เป็น 90% ผลจากการจำลองสถานการณ์นั้นคล้ายคลึงกับกรณี 100% มาก ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 6.2 รูปที่ 6.2 (ก) แสดงปริมาณกระแสตลอด 24 ชั่วโมง อาจสังเกตเห็นว่าการชาร์จแบตเตอรี่แถวที่ 1 เริ่มต้นที่เวลา 08.45 น. โดยประมาณ ซึ่งตั้งแต่ 08.00 น. เป็นต้นมา มอเตอร์ได้รับกระแสจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วย และแบตเตอรี่แถวที่ 2 เข้าชาร์จที่เวลา 09.00 น. จากนั้นก็จะเป็นแถวที่ 3 4 และ 5 ไปตามลำดับ ในช่วงตลอดเวลากลางวัน แผงเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายพลังงานให้มอเตอร์ไปพร้อมกันด้วย เมื่อแบตเตอรี่แถวที่ 5 เข้าชาร์จที่เวลา 10.10 น. แล้ว กระแสที่ดึงจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียล เมื่อพิจารณารูปคลื่นของแรงดันที่แสดงด้วยกราฟเส้นทึบในรูปที่ 6.2 (ข) อาจสังเกตได้ชัดเจนจากรูปคลื่นถึงวงรอบการชาร์จแบตเตอรี่แบบ CCC ตามด้วย CVC กราฟที่แสดงด้วยเส้นประ

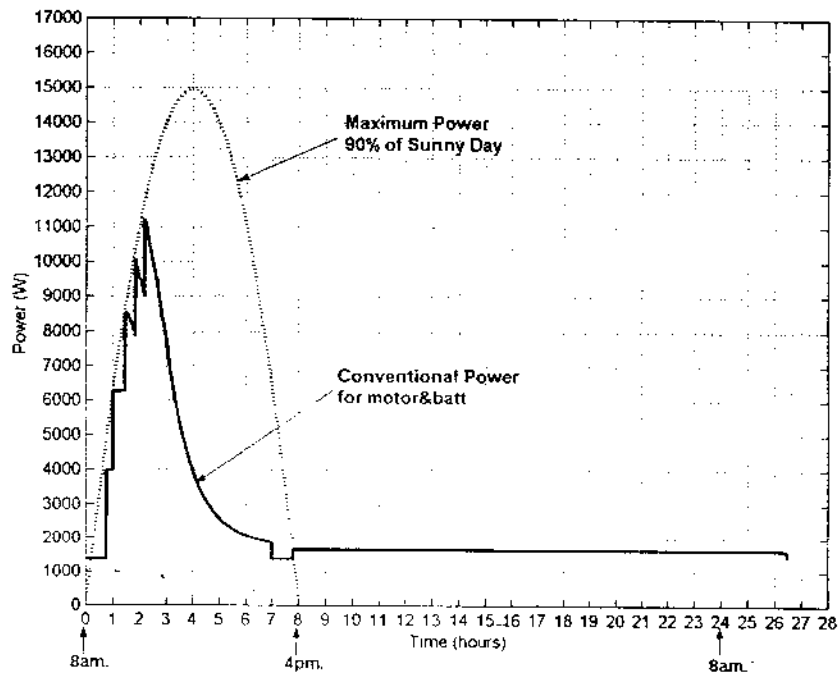
นั้นหมายถึงกระแส (รูปที่ 6.2 (ก)) และแรงดัน (รูปที่ 6.2 (ข)) ที่สามารถใช้ประโยชน์ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตลอดช่วงเวลากลางวัน ในส่วนของรูปที่ 6.2 (ค) เป็นกำลังไฟฟ้า ซึ่งเป็นปริมาณที่สังเคราะห์มาจากกระแสและแรงดัน อาจสังเกตได้ว่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ คือ 11.248 kW เป็นช่วงเวลาสั้นๆ เมื่อนำแบตเตอรี่ครบทั้ง 5 แถวเข้าชาร์จ จากนั้นกำลังไฟฟ้าจะลดลงอย่างรวดเร็วตามสภาพการตั้งกระแสเพื่อชาร์จแบตเตอรี่ จะเห็นว่าสามารถชาร์จแบตเตอรี่ทั้ง 5 แถว แถวละ 10 ลูก ได้เสร็จสมบูรณ์ในเวลา 15.00 น. ในช่วงเวลาดังกล่าว ตั้งแต่ 11.00 น. เป็นต้นไปจนถึง 16.00 น. จะเห็นว่ามีปริมาณกำลังไฟฟ้าเหลือให้ใช้ประโยชน์ได้ค่อนข้างมาก ขณะที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถให้กำลังสูงสุดประมาณ 15 kW ในช่วงเวลาสั้นๆ ประมาณเที่ยงวัน อย่างไรก็ตามการจะนำโหนดมาต่อพ่วงเพื่อใช้ประโยชน์กำลังไฟฟ้าในส่วนนี้ จะต้องคำนึงถึงรายละเอียดของรูปแบบการตั้งกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่โหนดต้องการนำมาพิจารณาควบคู่ไปกับรูปลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้นของกระแสและแรงดันที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ตั้งแต่เวลา 15 น. เศษใกล้ 16.00 น. มอเตอร์จะรับพลังงานจากแบตเตอรี่ผ่านวงจรสับไฟฟ้า เช่นเดียวกับกรณีที่มีความเข้มแสงอาทิตย์เป็น 100% ทุกประการ



(ก)
(รูปที่ 6.2)



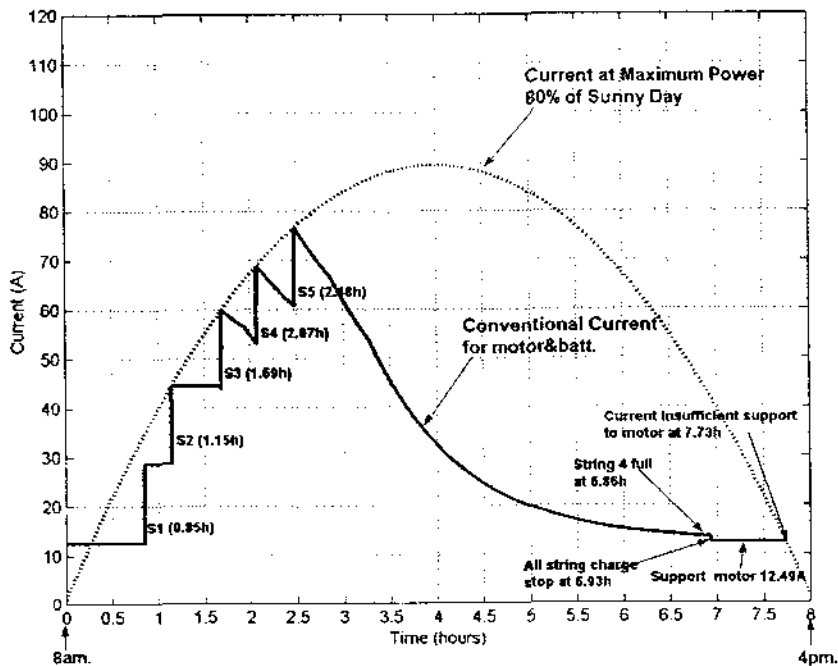
(ข)



(ค)

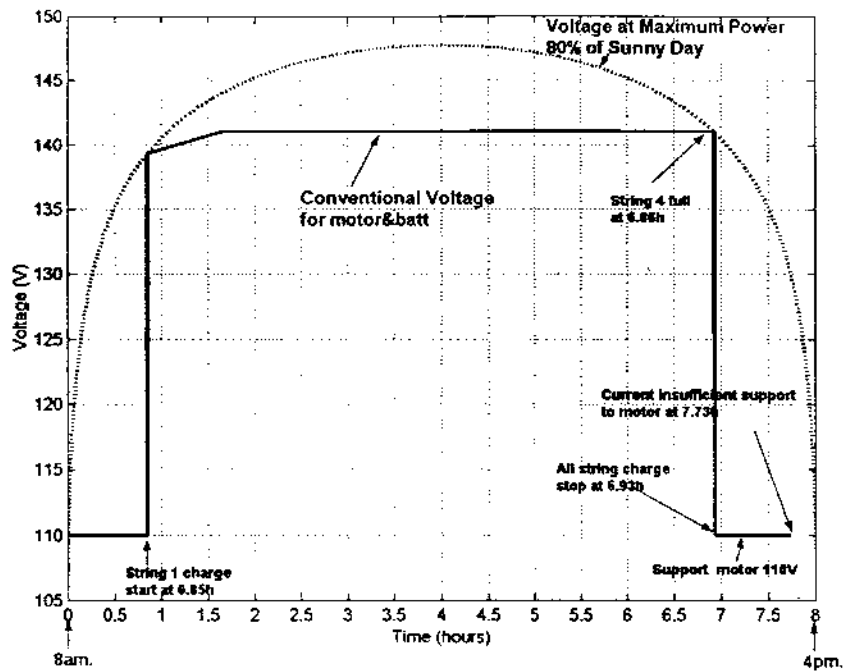
รูปที่ 6.2 พลวัตทางพลังงานกรณีความเข้มแสงอาทิตย์ 90% (ก) กระแส (ข) แรงดัน (ค) กำลังไฟฟ้า

กรณีที่มีความเข้มแสงอาทิตย์เป็น 80% ผลที่ได้จะคล้ายคลึงกับกรณีของ 90 และ 100% การชาร์จแบตเตอรี่ให้สมบูรณ์ทำได้เพียง 4 แกว ภายในเวลา 15.00 น. หรือ 40 ลูก ขนาดของกระแสและแรงดันลดลงอย่างเห็นได้ชัด แบตเตอรี่แกวที่ 5 ชาร์จค้างอยู่เพราะแรงดันไฟฟ้าไม่เพียงพอในช่วงท้ายของการชาร์จ การทำงานของระบบหลัง 15.45 น. ไปแล้ว ยังคงเหมือนกับสองกรณีแรก การนำเสนอผลจากการจำลองสถานการณ์จึงนำเฉพาะในช่วงเวลา 08.00–16.00 น. มาขยายให้เห็นรายละเอียดในรูปแบบที่ 6.3 (ก)–(ค) การทำความเข้าใจกับผลที่นำเสนอคงเหมือนกับที่ได้อธิบายผ่านมาแล้วของกรณี 90 และ 100% จึงขอไม่อธิบายซ้ำอีก

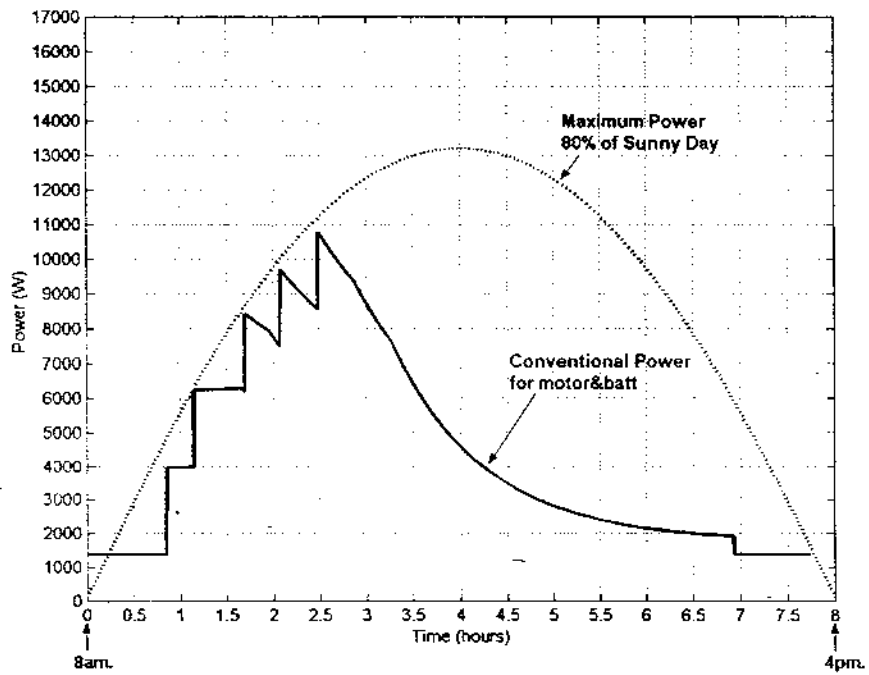


(ก)

(รูปที่ 6.3)



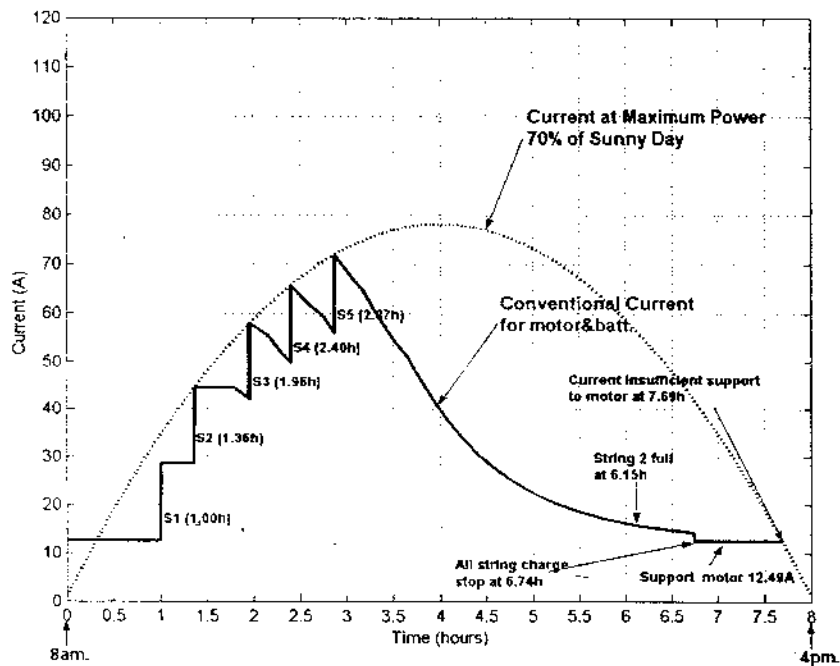
(ก)



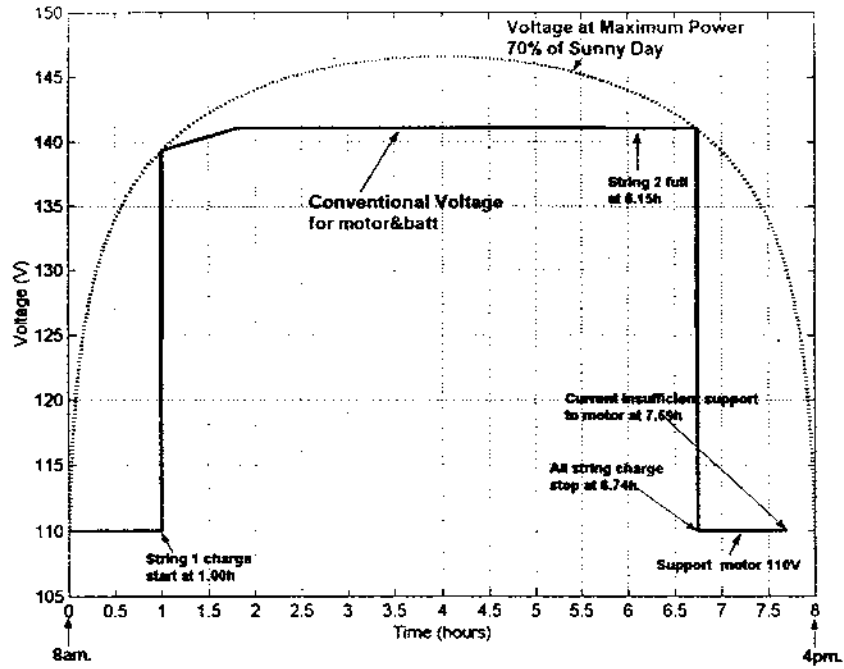
(ค)

รูปที่ 6.3 พลวัตทางพลังงานกรณีความเข้มแสงอาทิตย์ 80% (ก) กระแส (ข) แรงดัน (ค) กำลังไฟฟ้า

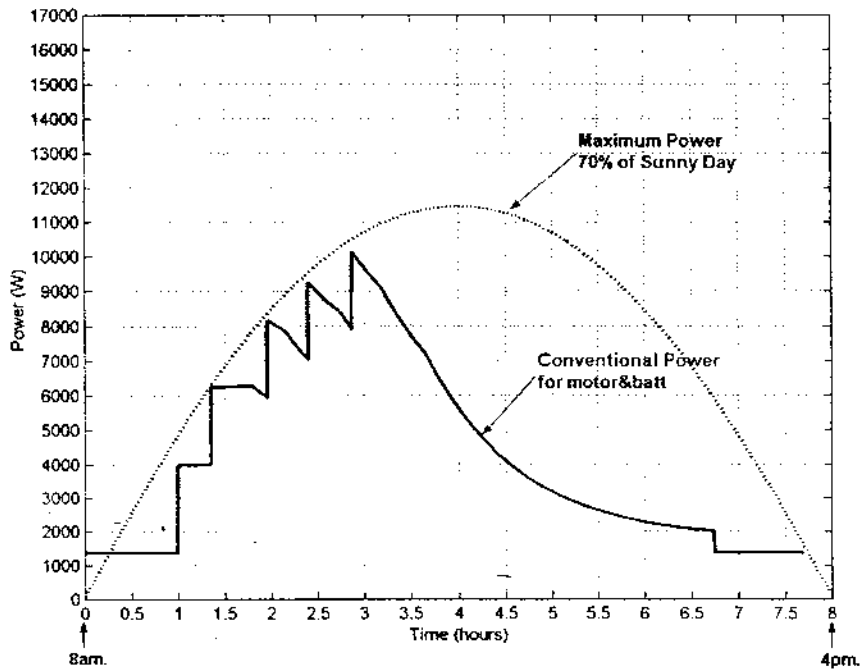
กรณีที่มีความเข้มแสงอาทิตย์เป็น 70% ดังผลที่นำเสนอในรูปแบบที่ 6.4 (ก) – (ค) เป็นกรณีที่แสงอาทิตย์ตลอดวันเริ่มอ่อนจนส่งผลต่อการทำงานของระบบอย่างมาก ในระบบพลังงานแสงอาทิตย์ของงานวิจัยนี้ เราคาดหวังให้ระบบทำงานได้ 24 ชั่วโมง ในช่วงกลางวันที่มีแดดได้คาดหวังว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะสามารถจ่ายพลังงานแก่มอเตอร์ 110V 12.49A และชาร์จแบตเตอรี่ได้ 50 ลูกเสร็จสิ้น เพื่อจะใช้แบตเตอรี่นั้นจ่ายพลังงานแก่มอเตอร์ในช่วงเวลาเย็นและกลางคืน โดยถือว่ามอเตอร์มีความสำคัญอันดับหนึ่ง ถ้าเปรียบเทียบกับกรชาร์จแบตเตอรี่ เมื่อแสงอาทิตย์อ่อนเช่นนี้หากเราพิจารณากราฟของกระแส ดังรูปที่ 6.4 (ก) จะเห็นว่าระบบสามารถสับแบตเตอรี่เข้าชาร์จได้ครบทั้ง 5 แถว ที่เวลา 09.00 น. 09.22 น. 09.58 น. 10.24 น. และ 10.52 น. ตามลำดับ แต่เนื่องจากแรงดันอ่อนลงในช่วงบ่าย ดังกราฟเส้นประในรูปแบบที่ 6.4 (ข) จนไม่สามารถชาร์จในช่วง CVC ได้สมบูรณ์ทุกแถว จะมีเพียงแค่ 2 แถวแรกเท่านั้นที่ผ่านการชาร์จอย่างสมบูรณ์ แบตเตอรี่ในแถวที่ 3 4 และ 5 ต้องรอการชาร์จในวันรุ่งขึ้น ซึ่งการชาร์จแบตเตอรี่ทุกแถวยุติที่เวลา 14.45 น.



(ก)
(รูปที่ 6.4)



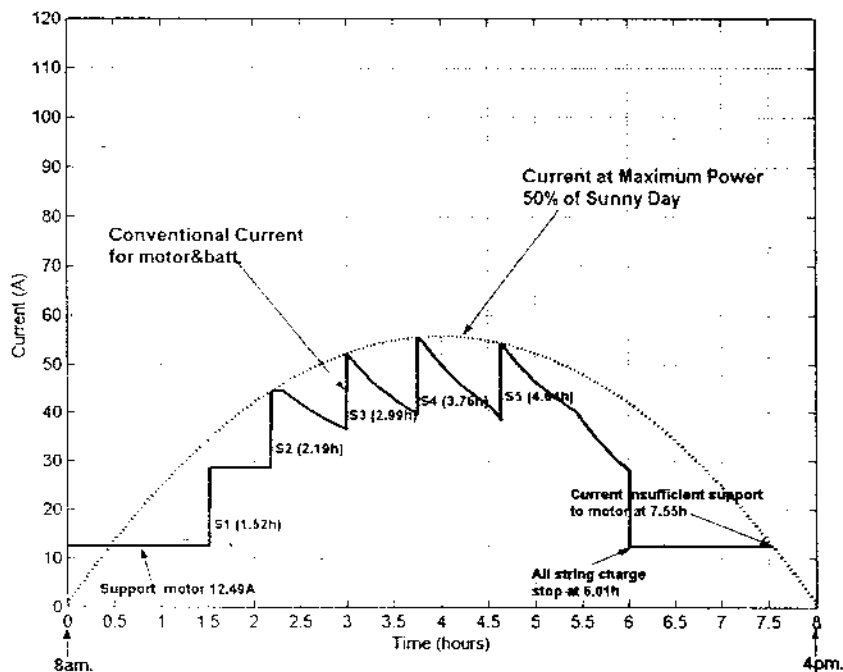
(ข)



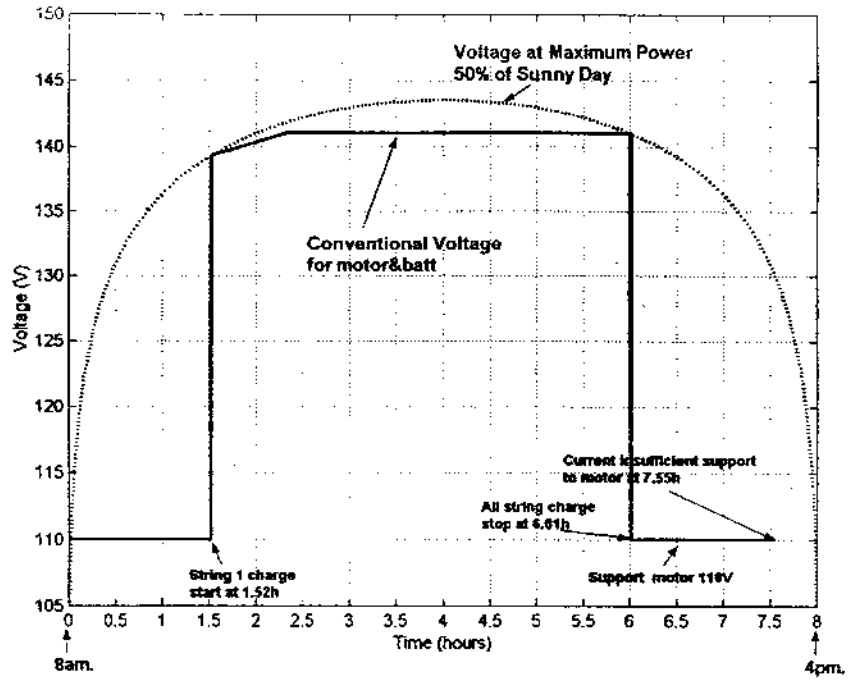
(ค)

รูปที่ 6.4 พลวัตทางพลังงานกรณีความเข้มแสงอาทิตย์ 70% (ก) กระแส (ข) แรงดัน (ค) กำลังไฟฟ้า

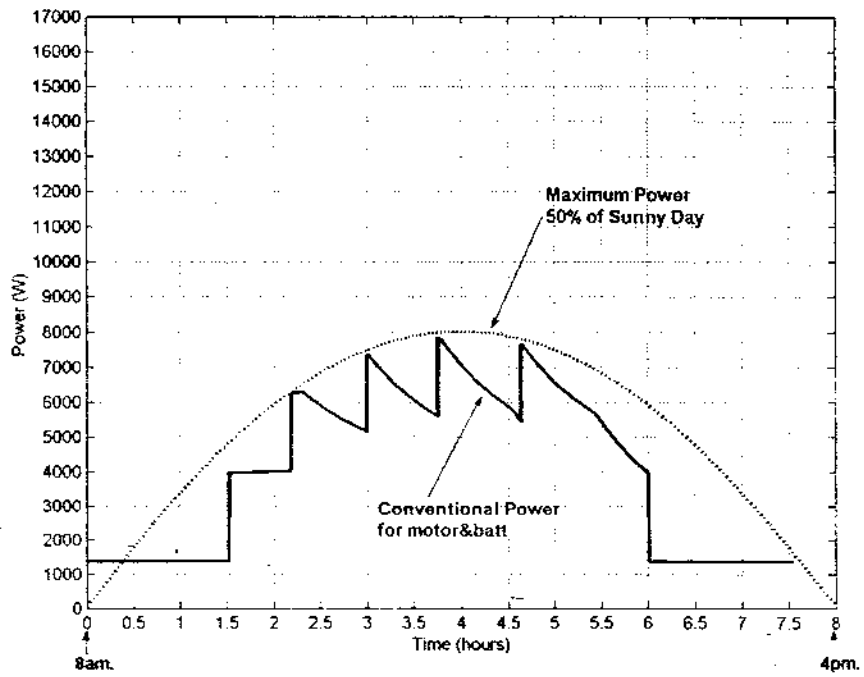
กรณีที่มีความเข้มแสงอาทิตย์เป็น 60% การจำลองสถานการณ์ให้ผลที่คล้ายกับกรณี 70% มาก การชาร์จแบตเตอรี่ทำได้สมบูรณ์เพียง 2 แดว หรือ 20 ลูก เพียงแค่รับเข้าชาร์จและชาร์จเสร็จสิ้นที่เวลาล่าช้าออกไปเมื่อเทียบกับกรณี 70% ส่วนการจ่ายกำลังให้มอเตอร์ในช่วงเวลากลางวันนั้นก็ยังคงทำได้ตามปกติ ดังนั้นจึงขอเสนอวิธีที่จะอธิบายโดยละเอียด รูปกราฟต่าง ๆ ก็คล้ายกับรูปที่ 6.4 (ก) – (ค) เป็นอย่างมาก กรณีที่แดดอ่อนจนความเข้มต่ำกว่า 80% นั้นเนื่องจากแบตเตอรี่ไม่อาจชาร์จได้สมบูรณ์ทั้ง 5 แดว การปฏิบัติงานตลอด 24 ชั่วโมง จึงไม่อาจทำได้ เพราะแบตเตอรี่มีพลังงานสะสมไม่เพียงพอ และไม่ควรรใช้แบตเตอรี่หากชาร์จมาอย่างไม่เต็มที เพราะจะทำให้แบตเตอรี่มีอายุใช้งานสั้น และขณะใช้งานพลังงานจะหมดไปอย่างรวดเร็วมาก ในกรณีที่จำเป็นจริง ๆ ที่จะต้องใช้แบตเตอรี่ในช่วงเย็นและค่ำ ก็จะต้องเลือกแค่เพียงชุดที่ชาร์จอย่างสมบูรณ์แล้วมาใช้งาน ซึ่งอาจจัดให้ระบบสามารถทำงานได้ตลอดวันเพียง 10 – 15 ชั่วโมงเท่านั้น แล้วแต่กรณี



(ก)
(รูปที่ 6.5)



(ข)



(ค)

รูปที่ 6.5 พลวัตทางพลังงานกรณีความเข้มแสงอาทิตย์ 50% (ก) กระแส (ข) แรงดัน (ค) กำลังไฟฟ้า

กรณีที่มีความเข้มแสงอาทิตย์เป็น 50% เมื่อพิจารณารูปที่ 6.5 (ก) และ (ข) จะเห็นว่าเรายังสามารถใช้พลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขับเคลื่อนมอเตอร์ได้ตลอดวัน แต่การชาร์จแบตเตอรี่ประสบปัญหาว่าไม่อาจทำได้สมบูรณ์เลยแม้แค่แถวเดียว จากรูปที่ 6.5 (ค) อาจสังเกตเห็นว่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีเพียง 8 kW เท่านั้น ในช่วงเวลาสั้น ๆ ที่แนวแสงกระทำในลักษณะได้ฉากกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์

เมื่อประมวลผลจากการจำลองสถานการณ์เข้าด้วยกัน อาจสรุปได้ว่า ระบบที่ใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์นี้ให้พลังงานมากพอ เพื่อจ่ายกำลังแก่มอเตอร์และปั๊มตลอดช่วงกลางวัน ซึ่งเราให้ความสำคัญเป็นลำดับหนึ่ง กรณีที่ความเข้มแสงอาทิตย์อ่อนกว่า 80% โดยประมาณ ไม่อาจชาร์จแบตเตอรี่ได้เสร็จสมบูรณ์ทั้ง 50 ลูก อย่างไรก็ตาม ถ้าความเข้มแสงอาทิตย์โดยเฉลี่ยตลอดวันไม่ต่ำมากจนถึงระดับ 50 – 55% ในช่วงเวลาหลัง 11.00 น. ไปแล้ว มีพลังงานบางส่วนที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้

6.4 ฐานกฎเพื่อกำกับจัดการพลังงาน

จากการอภิปรายผลในหัวข้อที่ผ่านมา เราได้ทราบว่าบางกรณีอาจมีพลังงานไฟฟ้าผลิตได้มากเกินไปเกินความต้องการของโหลด นั่นหมายความว่า ในความเป็นจริงผู้ใช้ระบบสามารถเพิ่มโหลดให้แก่ระบบได้ในจังหวะเวลาที่เหมาะสม สำหรับโครงสร้างระบบที่พิจารณาในงานวิจัยนี้ เรามีจำนวนและประเภทของโหลดตายตัว จึงเห็นได้ว่าปัญหาที่เกิดขึ้นกับกรณีที่แดดอ่อนคือ การชาร์จแบตเตอรี่ทำได้ไม่สมบูรณ์ ดังนั้น หากเราพยายามจัดการพลังงานในส่วนนี้ให้ดีขึ้น ก็อาจดำเนินการชาร์จแบตเตอรี่ได้ดีขึ้นด้วย

การออกแบบฐานกฎในงานวิจัยนี้ เป็นการดำเนินงานในขั้นต้น เพื่อทดลองแสวงหาหนทางที่อาจเป็นไปได้ ในการจัดการพลังงานที่มีอยู่ให้สามารถใช้ประโยชน์ได้สูงสุด โดยมีเป้าหมายเป็นการชาร์จแบตเตอรี่ทั้ง 50 ลูก การออกแบบฐานกฎมีแนวทางในแบบอัตโนมัติ บนรากฐานความเข้าใจด้านพลวัตทางพลังงานของระบบ ซึ่งสังเกตได้ว่าปัญหาในการชาร์จแบตเตอรี่ได้ไม่สมบูรณ์มาจากสาเหตุสำคัญประการหนึ่งคือ ช่วงการชาร์จแบบ CVC สำหรับแบตเตอรี่แต่ละแถวที่มี 10 ลูกอนุกรมกันนั้น ต้องการแรงดันไฟฟ้า 141 V คงที่โดยประมาณ ป้อนแก่แถวแบตเตอรี่ วิธีหนึ่งที่น่าสนใจในการแก้ไขปัญหานี้คือ จัดแบตเตอรี่เป็นชุดเล็กลง

เช่นในที่นี่ได้ลองพิจารณาจัดแบตเตอรี่เป็น 10 ชุด แต่ละชุดมี 5 ลูกต่ออนุกรมกัน และการดำเนินงานของระบบ เพื่อจ่ายพลังงานแก่โหลด อาศัยการตัดสินใจตามฐานกฎต่อไปนี้

ถ้า (พลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไม่เพียงพอที่จะขับมอเตอร์ และพลังงานจากแบตเตอรี่มีน้อยเกินกว่าที่จะใช้งานได้) แล้ว

(ให้หยุดเดินเครื่องระบบ)

ถ้า (พลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไม่เพียงพอที่จะขับมอเตอร์) แล้ว

(ให้มอเตอร์รับพลังงานจากแบตเตอรี่)

ถ้า (พลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีเพียงพอจะขับมอเตอร์) แล้ว

(ให้ใช้พลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขับมอเตอร์เป็นลำดับความสำคัญแรก)

ถ้า (ขับมอเตอร์ด้วยพลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ และคงมีพลังงานส่วนเกิน) แล้ว

- {1. ให้วินิจฉัยว่ากระแสและแรงดันจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพียงพอที่จะชาร์จแบตเตอรี่ได้กี่ชุดอนุกรมหรือขนานกันหรือผสมให้สับแบตเตอรี่ด้วยจำนวนชุดมากที่สุดเข้าชาร์จ, บันทึกสถานภาพการเข้าชาร์จของแบตเตอรี่
2. ให้วินิจฉัยอย่างสม่ำเสมอว่าจะเพิ่มชุดแบตเตอรี่เข้าชาร์จได้หรือไม่, บันทึกสถานภาพเมื่อเพิ่มชุดแบตเตอรี่เข้าชาร์จ
3. ให้วินิจฉัยว่าแบตเตอรี่ชุดใดชาร์จเสร็จสิ้นสมบูรณ์แล้ว ให้ปลดออกและบันทึกสถานภาพของแบตเตอรี่
4. ให้วินิจฉัยว่าพลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ลดลงหรือไม่ หากลดลงจนมีผลต่อการชาร์จให้พิจารณาปลดชุดแบตเตอรี่ออกจากการชาร์จทีละชุด โดยชุดที่เข้าชาร์จทีหลังจะถูกปลดออกก่อน, บันทึกสถานภาพของแบตเตอรี่}

ในภาพรวม กฎการควบคุมเหล่านี้พยายามจัดแบตเตอรี่เข้าชาร์จ เพื่อเป็นการดึงพลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์ให้มากที่สุด เพราะมีโหลดในระบบเพียงแค่มอเตอร์และแบตเตอรี่ขณะชาร์จเท่านั้น อีกทั้งรูปแบบการจัดชุดแบตเตอรี่จำกัดเป็น 5 ลูกอนุกรมต่อชุด อาจสับแบตเตอรี่หลายชุดอนุกรมเข้าชาร์จ หรือหลายชุดแบบขนาน หรือผสมกันทั้งอนุกรมและขนานเข้าชาร์จ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับว่าจะต้องมีแรงดันมากพอสำหรับวัฏจักรของการ

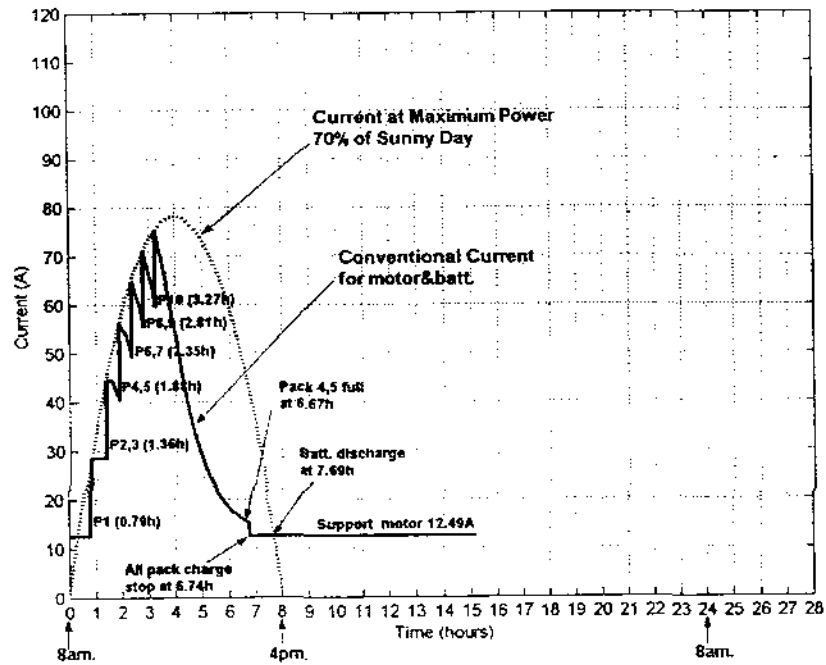
ชาร์จแบบ CCC ตามด้วย CVC และต้องมีกระแสмаกพอด้วย กระแสสูงสุดที่ใช้ในการชาร์จคือ 16 A สำหรับแต่ละชุดแบตเตอรี่ ขณะที่แรงดันสูงสุดจะเป็น 70 V สำหรับแต่ละชุด

กฎเหล่านี้ได้รับการนำไปนวัตเป็นโปรแกรมการควบคุมกำกับสั่งการ ด้วยภาษา Dynamic C™ ใช้งานกับ ZWorld™ Microcontroller Board (Zworld Inc.) ดังมีรายละเอียดของโปรแกรมแสดงไว้ในผนวก ก การทดสอบการทำงานของตัวควบคุมนี้ ดำเนินงานในลักษณะการจำลองสถานการณ์ที่มีฮาร์ดแวร์ต่อร่วม (hardware-in-loop simulation) ตัวควบคุมที่เป็นฮาร์ดแวร์นี้เชื่อมต่อกับ PC ผ่านพอร์ตเครื่องพิมพ์ โดยได้พัฒนาวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนหนึ่งขึ้นทำหน้าที่ติดต่อสื่อสารด้านข้อมูล ให้ได้ถูกต้องระหว่างโปรแกรมจำลองสถานการณ์ระบบพลังงานกับตัวควบคุม ซึ่งมีรายละเอียดของแผนภาพวงจรและโปรแกรมสื่อสารข้อมูลแสดงไว้ในผนวก ข ของรายงานวิจัยนี้ ผลการดำเนินงานเพื่อทดสอบตัวควบคุมได้รับการกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

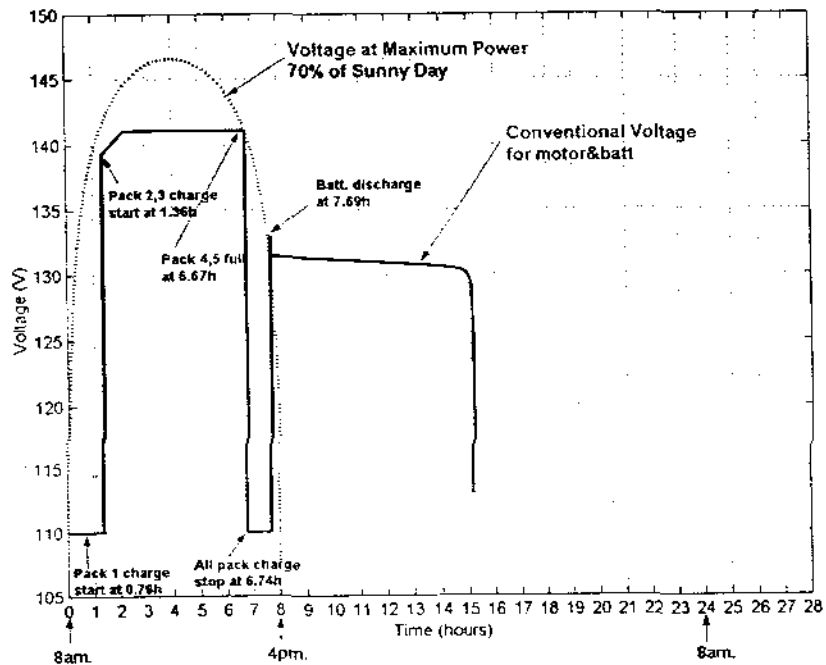
6.5 การทดสอบตัวควบคุมด้วยการจำลองผล

ในหัวข้อ 6.3 ที่ผ่านมา ได้มีการอธิบายโดยละเอียดถึงผลการดำเนินงานจำลองระบบเมื่อยังไม่มีการใช้ตัวควบคุมกำกับสั่งการ อาจสังเกตเห็นว่าปัญหาทางการจัดการพลังงานมีขึ้นกับกรณีที่แดดอ่อน เมื่อแดดแรงเช่นที่ความเข้มแสงอาทิตย์เป็น 80 – 100% นั้น ตัวควบคุมที่พัฒนาขึ้นให้ผลในทางพลวัตของพลังงานแทบไม่แตกต่างอะไรกับกรณีที่ยังมีได้ใช้ตัวควบคุมรูปลักษณะของกราฟพลวัตต่าง ๆ จึงคล้ายกันมาก จึงไม่ขอนำมาแสดงผลซ้ำอีก อย่างไรก็ตาม อาจมีความแตกต่างกันในด้านจังหวะเวลาที่สับชุดแบตเตอรี่เข้าชาร์จอยู่บ้าง แต่ก็มิได้มีนัยสำคัญ การแสดงผลสำหรับกรณีแดดอ่อนในหัวข้อ 6.5 นี้ พิจารณาที่ความเข้มแสงอาทิตย์ 70% และ 50% ตามลำดับ และนำแต่เฉพาะกราฟของกระแสกับแรงดัน มาแสดงผลประกอบอภิปราย เพราะสามารถให้ความเข้าใจในภาพรวมได้เป็นอย่างดี

จากการอธิบายไว้ในหัวข้อ 6.3 เมื่อแสงอาทิตย์มีความเข้ม 70% การชาร์จแบตเตอรี่ดำเนินการได้สมบูรณ์ 20 ลูก และมอเตอร์ได้พลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตลอดช่วงกลางวันที่มีแสงเพียงพอ การชาร์จแบตเตอรี่ยุติลงที่เวลา 14.45 น. โดยที่ยังมิได้ใช้ตัวควบคุม เมื่อนำตัวควบคุมมาใช้งาน จะสามารถชาร์จแบตเตอรี่ได้ 5 ชุด หรือ 25 ลูกอย่างสมบูรณ์ และมอเตอร์ก็ยังคงรับพลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตลอดช่วงกลางวันเช่นกัน ดังอาจสังเกตเห็นได้จากกราฟที่แสดงในรูปที่ 6.6 ว่า แบตเตอรี่ทั้ง 10 ชุดเข้าชาร์จได้ แต่ชาร์จได้สมบูรณ์จริงๆ เพียงแค่



(ก)



(ข)

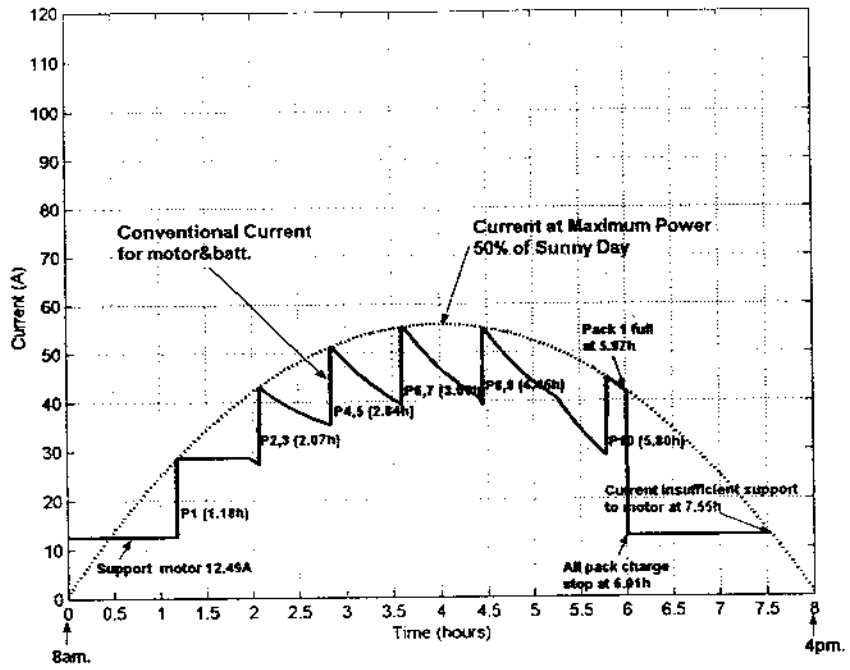
รูปที่ 6.6 พลวัตทางพลังงานกรณีความเข้มแสงอาทิตย์ 70% และมีการใช้ตัวควบคุม

(ก) กระแส (ข) แรงดัน

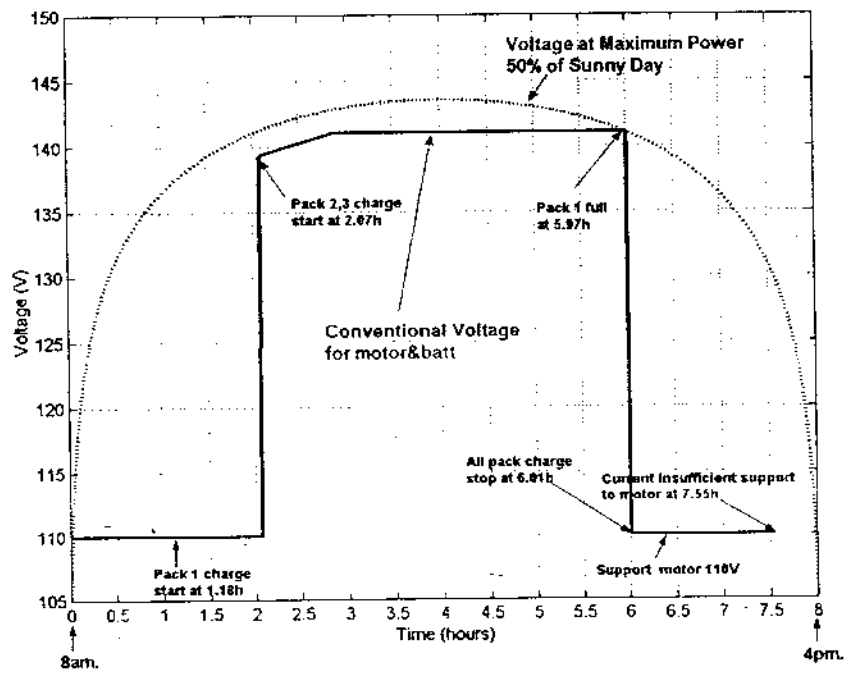
5 ชุด และการชาร์จยูติลงที่เวลาประมาณ 14.45 น. การชาร์จแบตเตอรี่ 25 ลูกนี้ เพื่อป้อนพลังงานแก่แบตเตอรี่ในช่วงเย็นและค่ำ ทำได้เพียง 7 ชั่วโมงโดยประมาณ ซึ่งหมายความว่าการทำงานของระบบจะต้องยูติที่เวลาประมาณ 23.00 น.

เมื่อความเข้มแสงอาทิตย์อ่อนจนมีเพียง 50% ทั้งกรณีที่มีและไม่มีตัวควบคุม เรายังคงสามารถใช้พลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ป้อนมอเตอร์ได้เกือบตลอดทั้งวัน แต่ในกรณีที่ไม่มีตัวควบคุม เราไม่อาจชาร์จแบตเตอรี่ให้สมบูรณ์ได้เลย ตัวควบคุมที่นำมาใช้ช่วยให้สามารถชาร์จแบตเตอรี่ได้สมบูรณ์ 1 ชุด หรือ 5 ลูก อย่างไรก็ตาม ด้วยแบตเตอรี่ที่ชาร์จสมบูรณ์แล้วจำนวนน้อย ๆ เช่นนี้ ก็ไม่อาจนำไปใช้ชาร์จให้มอเตอร์ได้เลยในช่วงเย็นและค่ำ แต่ก็ยังมีประโยชน์ในส่วนที่ช่วยให้ประหยัดเวลาชาร์จแบตเตอรี่ในวันถัดไป การชาร์จแบตเตอรี่ยูติที่เวลาประมาณ 14.00 น. และการทำงานของระบบโดยรวมต้องยูติลงที่เวลาประมาณ 15.30 น. ดังกราฟที่แสดงไว้ในรูปที่ 6.7

จากการนำเสนอผลและอภิปรายในหัวข้อที่ 6.3 และ 6.5 โดยลำดับนั้น เห็นได้ว่าตัวควบคุมแบบกึ่งอัตโนมัติสามารถช่วยให้เกิดการใช้พลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ได้อย่างคุ้มค่ามากขึ้นแม้จะไม่สูงมากนัก ซึ่งอาจมีเหตุมาจากการจัดชุดแบตเตอรี่เข้าชาร์จที่ยังไม่ดีพอประการหนึ่ง และอีกประการหนึ่งเป็นที่ระบบของเรามีโพลให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์เพียงสองกลุ่ม ได้แก่แบตเตอรี่และมอเตอร์ จึงทำให้ตัวควบคุมมีบทบาทน้อย และสังเกตได้ว่ามีพลังงานสำรองจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ หลังเที่ยงวันไปแล้วค่อนข้างมาก ดังนั้น การใช้ตัวควบคุมนี้ให้ได้คุ้มค่า น่าจะใช้กับระบบที่มีโพลหลายประเภทเป็นกลุ่ม ๆ สามารถจัดสรรเวลาการจ่ายพลังงานให้แก่โพลเป็นกลุ่ม ๆ ได้



(ก)



(ข)

รูปที่ 6.7 พลวัตทางพลังงานกรณีความเข้มแสงอาทิตย์ 50% และมีการใช้ตัวควบคุม

(ก) กระแส (ข) แรงดัน

บทที่ 7

สรุปและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุป

โครงการวิจัยนี้ดำเนินการศึกษา วิเคราะห์ และออกแบบ ระบบพลังงานที่มีแผงเซลล์แสงอาทิตย์และแบตเตอรี่ตะกั่วกรด เป็นแหล่งพลังงานผสมกัน เพื่อให้มีการใช้พลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์อย่างคุ้มค่า โดยโหลดหลักของระบบเป็นมอเตอร์กระแสตรงพิกัด 2.5 แรงม้า ต่อคู่ควบกับปั้มน้ำ ที่จะต้องใช้งาน 24 ชั่วโมง เนื่องจากความไม่แน่นอนของระบบงานวิจัยจึงต้องบูรณาการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขององค์ประกอบที่สำคัญในระบบ อันได้แก่ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ แบตเตอรี่ มอเตอร์ และปั้มน้ำ ดังที่แสดงรายละเอียดไว้ในบทที่ 2 ของรายงานนี้ จากแบบจำลองเหล่านี้จึงได้พัฒนาขึ้นเป็น โปรแกรมจำลองสถานการณ์ของระบบ ดังที่ได้อธิบายโครงสร้างโปรแกรมไว้ในบทที่ 5 เพื่อนำไปจำลองระบบในการศึกษาพฤติกรรมการพลังงานตลอด 24 ชั่วโมง

ในการที่จะทำให้เกิดการใช้พลังงานอย่างเหมาะสมที่สุด งานวิจัยนี้ได้พิจารณาและดำเนินงานใน 3 ลักษณะ กล่าวคือ หาหนทางขับเคลื่อนมอเตอร์ให้ประหยัดที่สุด ด้วยวิธีการสูญเสียในมอเตอร์ให้เหลือน้อยที่สุด ดังมีรายละเอียดปรากฏในบทที่ 3 ของรายงานนี้ อีกหนทางหนึ่งที่สามารถช่วยให้มีการใช้พลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้อย่างคุ้มค่า เป็นความพยายามจัดให้เกิดการถ่ายโอนกำลังงานได้สูงสุด ระหว่างแผงเซลล์แสงอาทิตย์กับโหลด ซึ่งได้อธิบายไว้ในบทที่ 4 ในทางปฏิบัติแนวทางนี้ต้องพึ่งพาตัวควบคุมความเร็วกำลังงานสูงสุด และหม้อแปลงคิซึ ซึ่งหม้อแปลงคิซึจะต้องทำงานด้วยอัตราส่วนการถ่ายโอนกำลังงานอย่างเหมาะสมที่สุดต่อโหลดแต่ละชนิด และอีกรูปแบบหนึ่งเป็นการแสวงหาโอกาสที่จะใช้พลังงาน ที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตออกมาให้ได้มากที่สุดเท่าที่โอกาสจะอำนวย แนวทางนี้ต้องอาศัยตัวควบคุมกำลังงาน ซึ่งได้พัฒนาขึ้นด้วยภาษา Dynamic C™ ใช้งานบน ZWorld™ Microcontroller Board ดังมีรายละเอียดของการออกแบบปรากฏอยู่ในบทที่ 6 และมีรายละเอียดโปรแกรมการควบคุมแสดงไว้ในผนวก ก จากผลการจำลองผลระบบเพื่อเปรียบเทียบระหว่างการมีตัวควบคุมใช้งานและเมื่อไม่มีตัวควบคุม พบว่าตัวควบคุมสามารถช่วยให้การชาร์จแบตเตอรี่ทำได้ดีขึ้นมากเมื่อแสงแดดอ่อน แต่ประโยชน์ที่ได้รับตรงนี้ยังไม่โดดเด่นมากนัก ซึ่งอาจเป็นเพราะการจัดการจัดชุดแบตเตอรี่เข้าชาร์จยังไม่ดีพอ และอาจเป็นไปได้ว่าประเภทของโหลดในระบบไม่หลากหลาย มีน้อย และไม่

กระจายตัว จึงเป็นสิ่งที่น่าพิจารณาว่า การใช้ระบบพลังงานแสงอาทิตย์อย่างคุ้มค่านั้น น่าจะใช้กับกลุ่มบ้านพักอาศัยจำนวนหลาย ๆ หลังคาเรือน และควรมีโหลหลายกลุ่มหลายประเภท กระจายการใช้งานตลอดช่วงระยะเวลากลางวัน ตั้งแต่ 08.00 น. ถึง 16.00 น.

7.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรได้มีการศึกษาว่ารูปแบบการจัดแบตเตอรี่เข้าชาร์จ จัดอย่างไรจึงจะเหมาะสมที่สุด การจัดแบตเตอรี่ให้ชาร์จและดิสชาร์จได้อย่างอิสระแต่ละลูกนั้น ในทางปฏิบัติต้องพึงหาอุปกรณ์ปรับคุมประจุไฟฟ้าติดตั้งแก่แบตเตอรี่แต่ละลูก ซึ่งควรพิจารณาด้านการลงทุนด้วย

2. ควรได้มีการศึกษาระบบพลังงานผสมผสาน ที่อาจมีการจัดพลังงานป้อนหมู่บ้านในชนบท โดยให้มีการศึกษาโหลคจริง และหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อจำลองโหลคเหล่านั้น หลังงานผสมผสานนั้นควรพิจารณาทั้งจากแสงอาทิตย์ ลม น้ำ (ถ้าธารและน้ำตก) ชยะมวลชีวภาพจากการเกษตรและกสิกรรม และมีแบตเตอรี่สำรองพลังงาน การศึกษาพลวัตทางพลังงานอาศัยการจำลองผล จากนั้นจึงทำการออกแบบและสร้างระบบควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ ให้ทำการจัดการพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ

เอกสารอ้างอิง

- [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. Hoffinan, "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. Protopogopoulos, 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. 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. 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. Magnetics*, vol. 35, no. 5, 1999, pp. 3715-3717.
- [19] 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.
- [20] M. M. Saied, A. A. Hanafy, M. A. El-Gabaly, Y. A. Safar, M. G. Jaboori, K. H. A. Yamin and A. M. Sharaf, "Optimal design parameters for a pv array coupled to a dc motor via a dc-transformer," *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 6, no. 4, 1991, pp. 593-598.
- [21] Z. Zinger and A. Braunstein, "Dynamic matching of a solar-electrical (photovoltaic) system and estimation of the minimum requirements on the matching system," *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-100, no. 3, 1981, pp. 1189-1192.
- [22] S. Harrington, K. Corporation and J. Dunlop, "Battery charge controller characteristics in photovoltaic systems," *IEEE Aerospace and Electronics Systems Magazine*, vol. 7, iss. 8, 1992, pp. 15-21.

- [23] สราวุฒิ สุจิตจร และ เฟคัง เผ่าละออ, *โปรแกรมจำลองผลระบบพลังงานผสมผสาน (รายงานทางเทคนิค)*, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2544.
- [24] T. Suwannakum, K. Kirtikara, S. Thepa and R. Songprakorp, "Techno economic analysis of deep well photovoltaic water pumping with submersible dc motor/pump," *Proc. 6th ASEAN Conference on Energy Technology*, Bangkok, Thailand, 28-30 Aug. 1995.
- [25] *The Power Guide*, Intermediate Technology Publication, GB, 1994.
- [26] J. P. Thornton, "Cost-effective applications of photovoltaics," *Vision 2001: Energy and Environmental Engineering* (J. R. Flanagan ed.), Fairmont Press/Prentice Hall, 1996, pp. 203-207.
- [27] T. Markvart (ed.), *Solar Electricity*, John Wiley & Sons, 1994.
- [28] F. Kreith and R. E. West (ed.), *Handbook of Energy Efficiency-Section III Renewable Energy*, CRC Press, 1997.
- [29] J. P. Nelson and W. K. Bolin, "Basic and advances in battery systems," *IEEE Trans. Industry Applications*, vol. 31, no. 2, 1995, pp. 419-428.
- [30] สราวุฒิ สุจิตจร, "แนวความคิดในการแผนแบบและสร้างตัวควบคุมชนิดระบบผู้เชี่ยวชาญเวลาจริง," *เอกสารการประชุมใหญ่วิชาการประจำปี 2534*, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยฯ, 31 ต.ค. - 3 พ.ย. 2534, น. 693-703.
- [31] สราวุฒิ สุจิตจร, "การวิเคราะห์สมรรถนะตัวควบคุมขำนาถการ," *วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา*, ปีที่ 7, ฉบับที่ 2, 2539, น. 39-47.

ผนวก ก

โปรแกรมตัวควบคุมแบบกำกับสั่งการ

```
/******  
  
Supervisory Controller  
BL1120/Little Giant (Zworld Inc.):Dynamic C  
  
*****/  
void          Decision(void);  
void          Decision1(void);  
void          Decision2(void);  
void          Decision3(void);  
void          Prm_DataOut(void);  
void          Prm_DataIn(void);  
long int      Encoder(int dd);  
  
int           n,z,h,Npack;  
double       Ia=12.49,Istr=16.00,Vt=110.00,Vstr=139.30,Vstrfull=141.00,CCC=0.79;  
//Must be floating  
double       t,Ipmax,Vpmax,Pmax,Ibatt,Itot,Vtot,Ptot,times[10],fitimesccc[10];  
int          data_in;          //Data input LPT port  
int          Prm_Data[16],Prm_DA,Prm_DB;          //Save temporary data input  
long int     D_Time,D_Ipmax,D_Vpmax,D_Ibatt,D_Sum,D_Status;  
  
main()  
{  Ddelay_1sec();          //Wait required after reset  
  output(PIOCA,0x07);          //Diabile Interrupt  
  output(PIOCB,0x07);          //Diabile Interrupt  
  output(PIOCA,0x7f);          //PA = In  
  output(PIOCB,0x3f);          //PB = Out  
  printf("\nFirst Run for Waiting Receive Data\n");  
  n=1;h=1;z=0;  
  while(1)          //Looping  
  {  hitwd();  
    Ddelay_100ms;  
    data_in=inport(PIODA);  
    if-(data_in != 0xff)  
    {  if (data_in != 0xaf)  
      {  Prm_DataIn();  
        else  
        {  D_Time =          Encoder(0x00); //Encoder data to D_Time  
          D_Ipmax =          Encoder(0x04); //Encoder data to  
D_Ipmax  
          D_Vpmax =          Encoder(0x08); //Encoder data to  
D_Vpmax  
          D_Ibatt =          Encoder(0x0c); //Encoder data to D_Ibatt  
          hitwd();  
          Decision();  
        }  
      }  
    }  
  }  
}
```

```

        Prn_DataOut();
    }
}

#####
void Decision(void)
{
    hitwd();
    D_Sum = D_Time+D_Ipmax+D_Vpmax+D_Ibatt;
    t = D_Time*0.01; //Multiply 0.01 for double
    Ipmax = D_Ipmax*0.01; //Multiply 0.01 for double
    Vpmax = D_Vpmax*0.01; //Multiply 0.01 for double
    Ibatt = D_Ibatt*0.01; //Multiply 0.01 for double
    Pmax = Ipmax*Vpmax;
    printf("\n#####\n");
    printf("\nRECEIVE DATA INPUT\n");
    printf("Time = %.2f h\n",t);
    printf("Ipmax = %.2f A\n",Ipmax);
    printf("Vpmax = %.2f V\n",Vpmax);
    printf("Ibatt = %.2f A\n",Ibatt);
    hitwd();
    printf("\nFOR ERROR CHECKING\n");
    printf("D_Sum = %ld\n",D_Sum);
    /*****/
    //This system must support DC motor first
    //Then support the charging of batts previously adequate current available
    //Find time for motor take energy from solar panel
    if (z == 0)
    {
        if (Ipmax < Ia)
        {
            D_Status=0X00;} //Batt. discharge energy to motor
        else
        {
            printf("\nMotor take energy from solar panel at %.2fh\n",t);
            z=1;
            D_Status=0X01; //Motor take energy from solar panel
            goto END_DECISION;
        }
    }
    /*****/
    //Find time and energy for charge batt 1st group and supply DC motor
    if (z == 1)
    {
        if (h == 1)
        {
            h=2;
            goto END_DECISION;
        }
        if (Ipmax < Ia+Istr)
        {
            D_Status=0X01;}
        else
        {
            times[n]=t;
            Itot=Ia+Istr;
            Vtot=Vt;
            Ptot=Itot*Vtot;
            printf("\nBatt pack 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,Vtot,Ptot);
        Npack=1; //Know charge start max 1 pack in first group every Percent of
area parabola
        fitimesccc[n]=times[n]+CCC; //Final time on CCC of batt group n
        n=n+1;
        z=2;
        D_Status=0X02; //Charge batt 1st group and supply DC motor
        goto END_DECISION;
    }
}
/*****/
//Find time and energy for charge batt 2nd group and supply DC motor
if (z == 2)
{
    if (h == 2) //Synchronization between PC and board
    {
        h=3;
        goto END_DECISION;
    }
//Batt 2nd group charge start on CCC of batt 1st group
if (t <= fitimesccc[1])
{
    if (Ipmax < Ia+(Istr*n))
    {
        D_Status=0X02;}
    else
    {
        Decision1();
        z=3;
        D_Status=0X03; //Charge batt 2nd group and supply DC motor
        goto END_DECISION;
    }
}
//Batt 2nd group charge start on CVC of batt 1st group
if (t > fitimesccc[1])
{
    if (Ipmax < Ia+Ibatt)
    {
        D_Status=0X02;}
    else
    {
        times[n]=t;
        Itot=Ia+Ibatt;
        Vtot=Vstr; //Know Vpmax >= Vstr at 2nd group every Percent of area parabola
        Ptot=Itot*Vtot;
        printf("\nBatt pack %d,%d in series charge start at time
%.2fh\n",Npack+1,Npack+2,times[n]);
        printf("Which I,V,P for supply batt and motor =
%.2fA,%.2fV,%.0fW respectively\n",Itot,Vtot,Ptot);
        Npack=Npack+2;
        fitimesccc[n]=times[n]+CCC;
        n=n+1;
        z=3;
        D_Status=0X03;
        goto END_DECISION;
    }
}
}
/*****/
//Find time and energy for charge batt 3rd group and supply DC motor
if (z == 3)
{
    if (h == 3) //Synchronization between PC and board

```

```

        {      h=4;
              goto END_DECISION;
        }
//Batt 3rd group charge start on CCC of batt 1st and 2nd group
if (t <= fitimesccc[1])
{      if      (Ipmax < Ia+(Istr*n))
      {      D_Status=0X03;}
      else
      {      Decision1();
        z=4;
        D_Status=0X04;          //Charge batt 3rd group and supply
DC motor
        goto END_DECISION;
      }
}
//Batt 3rd group charge start between on CVC of batt 1st group and CCC of batt 2nd group
if ((t > fitimesccc[1]) && (t <= fitimesccc[2]))
{      if      (Ipmax < Ia+Ibatt)
      {      D_Status=0X03;}
      else
      {      Decision2();
        z=4;
        D_Status=0X04;
        goto END_DECISION;
      }
}
//Batt 3rd group charge start on CVC of batt 1st and 2nd group
if (t > fitimesccc[2])
{      if      (Ipmax < Ia+Ibatt)
      {      D_Status=0X03;}
      else
      {      Decision3();
        z=4;
        D_Status=0X04;
        goto END_DECISION;
      }
}
}
/*****/
//Find time and energy for charge batt 4th group and supply DC motor
if (z == 4)
{      if      (h == 4) //Synchronization between PC and board
      {      h=5;
        goto END_DECISION;
      }
}
//Batt 4th group charge start on CCC of batt 1st,2nd and 3rd group
if (t <= fitimesccc[1])
{      if      (Ipmax < Ia+(Istr*n))
      {      D_Status=0X04;}
      else
      {      Decision1();
        z=5;
        D_Status=0X05;          //Charge batt 4th group and supply
DC motor
        goto END_DECISION;
      }
}

```

```

    }
  }
  //Batt 4th group charge start between on CVC of batt 1st group and CCC of batt 2nd and 3rd group
  if ((t > fitimesccc[1]) && (t <= fitimesccc[2]))
  {
    if (Ipmax < Ia+Ibatt)
    {
      D_Status=0X04;}
    else
    {
      Decision2();
      z=5;
      D_Status=0X05;
      goto END_DECISION;
    }
  }
  //Batt 4th group charge start between on CVC of batt 1st and 2nd group and CCC of batt 3rd group
  //Batt 4th group charge start on CVC of batt 1st,2nd and 3rd group
  if (t > fitimesccc[2])
  {
    if (Ipmax < Ia+Ibatt)
    {
      D_Status=0X04;}
    else
    {
      Decision3();
      z=5;
      D_Status=0X05;
      goto END_DECISION;
    }
  }
}
/*****/
//Find time and energy for charge batt 5th group and supply DC motor
if (z == 5)
{
  if (h == 5) //Synchronization between PC and board
  {
    h=6;
    goto END_DECISION;
  }
  //Batt 5th group charge start on CCC of batt 1st,2nd,3rd and 4th group
  if (t <= fitimesccc[1])
  {
    if (Ipmax < Ia+(Istr*n))
    {
      D_Status=0X05;}
    else
    {
      Decision1();
      z=6;
      D_Status=0X06; //Charge batt 5th group and supply
      DC motor
      goto END_DECISION;
    }
  }
  //Batt 5th group charge start between on CVC of batt 1st group and CCC of batt 2nd,3rd and 4th
  group
  if ((t > fitimesccc[1]) && (t <= fitimesccc[2]))
  {
    if (Ipmax < Ia+Ibatt)
    {
      D_Status=0X05;}
    else
    {
      Decision2();
      z=6;
      D_Status=0X06;
      goto END_DECISION;
    }
  }
}

```

```

    }
//Batt 5th group charge start between on CVC of batt 1st and 2nd group and CCC of batt 3rd and
4th group
//Batt 5th group charge start between on CVC of batt 1st,2nd and 3rd group and CCC of batt 4th
group
//Batt 5th group charge start on CVC of batt 1st,2nd,3rd and 4th group
    if (t > fitimesccc[2])
    {
        if (Ipmax < Ia+Ibatt)
        {
            D_Status=0X05;}
        else
        {
            Decision3();
            z=6;
            D_Status=0X06;
            goto END_DECISION;
        }
    }
}
/*****/
//Find time and energy for charge batt 6th group and supply DC motor
//Know charge max 6th group every Percent of area parabola
    if (z == 6)
    {
        if (h == 6) //Synchronization between PC and board
        {
            h=7;
            goto END_DECISION;
        }
//Batt 6th group charge start on CCC of batt 1st,2nd,3rd,4th and 5th group
        if (t <= fitimesccc[1])
        {
            if (Ipmax < Ia+(Istr*n))
            {
                D_Status=0X06;}
            else
            {
                Decision1();
                z=7;
                D_Status=0X07;          //Charge batt 6th group and supply
                DC motor
                goto END_DECISION;
            }
        }
    }
//Batt 6th group charge start between on CVC of batt 1st group and CCC of batt 2nd,3rd,4th and 5th
group
    if ((t > fitimesccc[1]) && (t <= fitimesccc[2]))
    {
        if (Ipmax < Ia+Ibatt)
        {
            D_Status=0X06;}
        else
        {
            Decision2();
            z=7;
            D_Status=0X07;
            goto END_DECISION;
        }
    }
}
//Batt 6th group charge start between on CVC of batt 1st and 2nd group and CCC of batt 3rd,4th
and 5th group
//Batt 6th group charge start between on CVC of batt 1st,2nd and 3rd group and CCC of batt 4th
and 5th group

```

//Batt 6th group charge start between on CVC of batt 1st,2nd,3rd and 4th group and CCC of batt 5th group

//Batt 6th group charge start on CVC of batt 1st,2nd,3rd,4th and 5th group

```

    if (t > fitimesccc[2])
    {
        if (Ipmax < Ia+Ibatt)
        {
            D_Status=0X06;}
        else
        {
            Decision3());
            z=7;
            D_Status=0X07;
            goto END_DECISION;
        }
    }
}
/*****/
//Find time which batt each group charge full
if (z == 7)
{
    if (h == 7) //Synchronization between PC and board
    {
        h=8;
        goto END_DECISION;
    }
    if (t < fitimesccc[1]+4)
    {
        D_Status=0X07;}
    else
    {
        printf("\nBatt 1st group charge full at time %.2fh\n",t);
        z=8;
        D_Status=0X08; //Batt 1st group charge full
    }
}
if (z == 8)
{
    if (t < fitimesccc[2]+4)
    {
        D_Status=0X08;}
    else
    {
        printf("\nBatt 2nd group charge full at time %.2fh\n",t);
        z=9;
        D_Status=0X09; //Batt 2nd group charge full
    }
}
if (z == 9)
{
    if (t < fitimesccc[3]+4)
    {
        D_Status=0X09;}
    else
    {
        printf("\nBatt 3rd group charge full at time %.2fh\n",t);
        z=10;
        D_Status=0X0a; //Batt 3rd group charge full
    }
}
if (z == 10)
{
    if (t < fitimesccc[4]+4)
    {
        D_Status=0X0a;}
    else
    {
        printf("\nBatt 4th group charge full at time %.2fh\n",t);
        z=11;
        D_Status=0X0b; //Batt 4th group charge full
    }
}

```

```

}
if (z == 11)
{
    if (t < fitimesccc[5]+4)
    {
        D_Status=0X0b;}
    else
    {
        printf("\nBatt 5th group charge full at time %.2fh\n",t);
        z=12;
        D_Status=0X0c;        //Batt 5th group charge full
    }
}
if (z == 12)
{
    if (t < fitimesccc[6]+4)
    {
        D_Status=0X0c;}
    else
    {
        printf("\nBatt 6th group or all group charge full at time %.2fh\n",t);
        z=13;
        D_Status=0X0d;        //Batt 6th group or all group charge full
    }
}
}
/*****/
//Find time batt charge stop
//Know batt all group will charge stop when charge start already all group
if ((n == 7) && (z < 13) && (Vpmax < Vstrfull))
{
    printf("\nBatt all group charge stop at time %.2fh\n",t);
    n=n+1;
    z=13;
    D_Status=0X0e;        //Batt all group charge stop
}
/*****/
//Find time batt discharge energy to motor due to energy from solar panel insufficient support to
motor
if ((z == 13) && (Ipmax < Ia))
{
    printf("\nBatt discharge energy to motor at time %.2fh\n",t);
    z=14;
    D_Status=0X00;        //Batt. discharge energy to motor
}
/*****/
    END_DECISION:
}

#####
void Decision1(void)
{
    times[n]=t;
    Itot=Ia+(Istr*n);
    if (Npack==1)
    {
        Vtot=Vstr;}
    else
    {
        Vtot=Vstr+2.152*(t-times[2]);}        //Slope of voltage on CCC duration is 2.152
    Ptot=Itot*Vtot;
    printf("\nBatt pack %d,%d in series charge start at time %.2fh\n",Npack+1,Npack+2,times
[n]);
    printf("Which I,V,P for supply batt and motor = %.2fA,%.2fV,%.0fW
respectively\n",Itot,Vtot,Ptot);
    Npack=Npack+2;
    fitimesccc[n]=times[n]+CCC;
    n=n+1;
}

```



```

}

#####
void      Decision2(void)
{
    times[n]=t;
    Itot=Ia+Ibatt;
    Vtot=Vstr+2.152*(t-times[2]);
    Ptot=Itot*Vtot;
    printf("\nBatt pack %d,%d in series charge start at time %.2fh\n",Npack+1,Npack+2,times
[n]);
    printf("Which I,V,P for supply batt and motor = %.2fA,%.2fV,%.0fW
respectively\n",Itot,Vtot,Ptot);
    Npack=Npack+2;
    fitimesccc[n]=times[n]+CCC;
    n=n+1;
}

#####
void      Decision3(void)
{
    times[n]=t;
    Itot=Ia+Ibatt;
    Vtot=Vstrfull;      //Know Vpmax >= Vstrfull every Percent of area parabola
    Ptot=Itot*Vtot;
    if      (Npack<9)
    {
        printf("\nBatt pack %d,%d in series charge start at time
%.2fh\n",Npack+1,Npack+2,times[n]);
        printf("Which I,V,P for supply batt and motor = %.2fA,%.2fV,%.0fW
respectively\n",Itot,Vtot,Ptot);
        Npack=Npack+2;
    }
    else
    {
        printf("\nBatt pack 10 charge start at time %.2fh\n",times[n]);
        printf("Which I,V,P for supply batt and motor = %.2fA,%.2fV,%.0fW
respectively\n",Itot,Vtot,Ptot);
        Npack=10;      //Know charge pack 10 at 6th group every Percent of area
parabola
    }
    fitimesccc[n]=times[n]+CCC;
    n=n+1;
}

#####
void      Prm_DataIn(void)
{
    int    ii,jj;
    ii=data_in & 0x000f;
    jj=(data_in >> 4) & 0x000f;
    if (Prm_DA == jj)
    {
        if (Prm_DB == Prm_DA)
        {
            Prm_Data[ii]=jj;}
        else
        {
            Prm_DB=Prm_DA;}
    }
    else
    {
        Prm_DA=jj;}
}

```

```

#####
void Prn_DataOut(void)
{
    int ii,data16;
    long int data32;
    data32=D_Status << 4;
    for (ii=0; ii<6; ii++)
    {
        data16=((data32 >> (4*ii)) & 0x00ff) | ii;
        outport(PIODB,data16); //Send data loop
        printf(" "); //Delay
        hitwd();
    }
    data32=D_Sum << 4;
    for (ii=0; ii<4; ii++)
    {
        data16=((data32 >> (4*ii)) & 0x00ff) | (ii+6);
        outport(PIODB,data16); //Send data loop
        printf(" "); //Delay
        hitwd();
    }
    outport(PIODB,0xff); //Send goto idle line
}

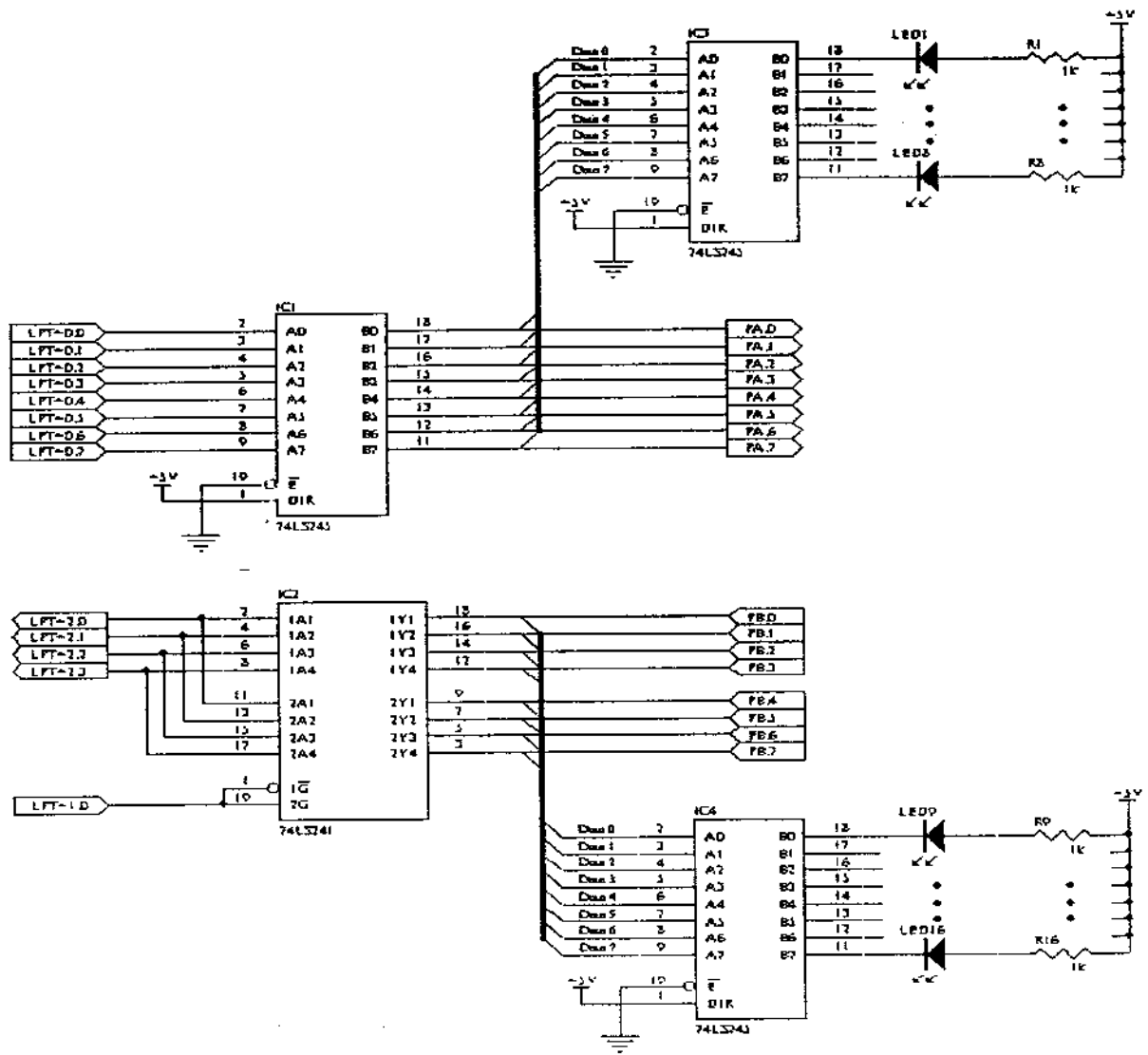
#####
long int Encoder(int dd)
{
    int ii;
    long int temp,d_temp;
    d_temp=0;
    for (ii=0; ii<4; ii++)
    {
        temp=Prn_Data[dd+ii];
        temp=(temp & 0x0f) << (ii*4);
        d_temp=d_temp | temp;
    }
    return(d_temp);
}

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

```

ผนวก ข

การเชื่อมต่อตัวควบคุมผ่านพอร์ตเครื่องพิมพ์ของPC



รูปที่ ข.1 แผนภาพวงจรมัลติเพล็กซ์สัญญาณสื่อสารข้อมูลแบบขนานผ่านพอร์ตเครื่องพิมพ์ของPC

การดำเนินงานจำลองผลที่มีฮาร์ดแวร์ต่อร่วมวงต้องมีการติดต่อสื่อสารกับPC ในงานวิจัยได้เลือกใช้พอร์ตขนานของเครื่องพิมพ์ ซึ่งต้องการวงจรมัลติเพล็กซ์สัญญาณสื่อสารข้อมูล

วงจรถัดลงกล่าวมีแผนภาพดังรูปที่ ข.1 LPT บัสทางด้านซ้ายของแผนภาพเป็นทางฝั่งเครื่องพิมพ์ บัสPAและPBเป็นทางด้านไมโครคอนโทรลเลอร์ โปรแกรมสื่อสารข้อมูลอาจเลือกLPTให้เป็น LPT1หรือLPT2 ก็ได้ ซึ่งทั้งคู่เป็นพอร์ทเครื่องพิมพ์มาตรฐานของPC ในภาพอาจสังเกตเห็น ว่า มี LPT+D.x มีความหมายว่าเป็นพอร์ทข้อมูลบิตที่ x ซึ่ง x อาจเป็น 0 ถึง 7 ส่วน LPT+1.0 นั้นหมายถึงพอร์ทควบคุมที่มีการใช้บิต 0 เพียงบิตเดียว และ LPT+2.x หมายถึงพอร์ทสถานะ ซึ่งตัวเลขที่แทนด้วย x ก็คือบิตสถานะนั่นเอง การส่งรับข้อมูลยังต้องใช้โปรแกรมสื่อสารข้อมูล ที่พัฒนาด้วยภาษาCมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

```
/******
```

Parallel communication support software (dos mode)

```
*****/
```

```
#include <stdio.h>
#include <conio.h>
#include <dos.h>
#include <math.h>
```

```
void Transfer_DataOI(void);
void Prn_DataOut(long int sd_in,int sd_jj); //Printer data output 1 frame
void Prn_DataIn(void); //Printer data inport 8 bit
```

```
int data_in,LPT1=0x378;
long int D_Time,D_Ipmax,D_Vpmax,D_Ibatt,D_Status,D_Sum;
```

```
#####
```

```
void Transfer_DataOI(void)
{ int ii,jj,xx,data8[10];
  long int temp32;
  printf("Send & Waiting Receive Data\n"); //Delay wating Z180 calculation
  SENDING:
  delay(1000);
  Prn_DataOut(D_Time,0x00); //Sending D_Time
  Prn_DataOut(D_Ipmax,0x04); //Sending D_Ipmax
  Prn_DataOut(D_Vpmax,0x08); //Sending D_Vpmax
  Prn_DataOut(D_Ibatt,0x0c); //Sending D_Ibatt
  outport(LPT1,0xaf); //Conversion Command
  delay(20);
  outport(LPT1,0xff); //Idle State
  for (ii=0; ii<10; ii++)
  { for (xx=0; xx<200; xx++)
    { delay(3);
      Prn_DataIn(); //Get data_in 8 bit
```

```

    jj=data_in & 0x000f;
    if (jj == ii)
    { goto DATAINCOM;}
}
goto SENDING;
DATAINCOM:
jj=(data_in >>4) & 0x000f;
data8[ii]=jj;
}
D_Status=0x00;
for (ii=0; ii<6; ii++)
{   temp32=data8[ii];
    temp32=(temp32 & 0x0f) << (ii*4);
    D_Status=D_Status | temp32;
}
D_Sum=0x00;
for (ii=0; ii<4; ii++)
{   temp32=data8[ii+6];
    temp32=(temp32 & 0x0f) << (ii*4);
    D_Sum=D_Sum | temp32;
}
}

#####
void Prn_DataOut(long int sd_in,int sd_jj)
{ int      ww;
  long int temp;
  for (ww=0 ;ww<4 ;ww++)
  {   temp=sd_in << 4;
      temp=((temp >> (4*ww)) & 0x00f0) | sd_jj;
      output(LPT1,temp);
      delay(10);
      sd_jj++;
  }
}

#####
void Prn_DataIn(void)
{   int data_l,data_h;
  output(LPT1+2,0x0000);    //Select Data_H
  data_h=inport(LPT1+1);
  data_h=((data_h & 0x00f0) ^ 0x0080);
  output(LPT1+2,0x00f0);    //Select Data_L
  data_l=inport(LPT1+1);
  data_l=((data_l & 0x00f0) ^ 0x0080) >> 4;
  data_in=(data_l | data_h);
}

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

```

ประวัตินักวิจัย

สราวุฒิ สุจิตจร สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีทางวิศวกรรมไฟฟ้า จากโรงเรียนนายเรืออากาศ และได้รับเกียรตินิยมอันดับหนึ่ง ได้ศึกษาต่อด้วยทุนกองทัพอากาศในระดับปริญญาเอก ทางวิศวกรรมไฟฟ้า ณ มหาวิทยาลัยเบอร์มิงแฮม ประเทศอังกฤษ สำเร็จการศึกษาปริญญาเอก เมื่อ พ.ศ. 2530 ด้วยงานวิจัยวิทยานิพนธ์ทางด้านระบบควบคุม โดยเน้นทางการควบคุมเวลาจริงด้วยไมโครโพรเซสเซอร์ในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน เพื่อการประหยัดพลังงานไฟฟ้าในการขับเคลื่อน ภายหลังจากที่สำเร็จการศึกษาแล้ว ได้ดำเนินงานวิจัยมาอย่างต่อเนื่องทางระบบควบคุมและการประมวลผลสัญญาณ มีความชำนาญและมีผลงานวิจัยปรากฏทางด้าน ระบบควบคุมไม่เป็นเชิงเส้น ระบบควบคุมชาญฉลาด การระบุเอกลักษณ์ระบบเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น ระบบขับเคลื่อนทางไฟฟ้า ตลอดจนการวิเคราะห์เสถียรคนตรีไทย