

บทที่ 4

ระเบียบวิธีการวิจัย

4.1 กล่าวนำ

ในโครงงานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยเพื่อการพัฒนารูปแบบ และนำเสนอเนื้อหาวิธีการวิเคราะห์ในอีกรูปแบบหนึ่งตามรายงานการวิจัย ที่จะเป็นการพัฒนาในส่วนของการพิจารณาด้านพลังงาน และการออกแบบระบบเพื่อให้การใช้งานของระบบมีประสิทธิภาพและเกิดประโยชน์สูงสุด อันเนื่องมาจากการใช้งานของระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ที่มีการออกแบบระบบพลังงานสำรองที่ไม่เหมาะสม ก็มักจะมีปัญหาในแง่ของทางเศรษฐศาสตร์และสมรรถนะของระบบเข้ามาเกี่ยวข้อง อีกทั้งขนาดของระบบจะต้องใหญ่จนเกินความจำเป็นเพื่อที่จะให้มีปริมาณพลังงานเพียงพอสำหรับจ่ายให้กับระบบเก็บสะสมพลังงานได้

4.2 การวิเคราะห์การจ่ายพลังงานของระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ด้วยกราฟคุณลักษณะ

การออกแบบของระบบสุริยะ โดยมีพื้นฐานจากการทำดุลพลังงานระหว่างระบบย่อยทั้งหลายที่รวมเป็นระบบที่กำลังศึกษาอยู่ การวิเคราะห์ที่ได้ทำไปจัดว่าเหมาะสมเพียงพอสำหรับการประเมินระบบในขั้นต้น และสามารถใช้อุปกรณ์คอมพิวเตอร์ง่าย ๆ มาช่วยทำงาน อย่างไรก็ตามการทำเช่นนั้นก็มีข้อจำกัด เพราะว่าใช้สมมุติฐานว่าตัวเก็บสะสมพลังงานมีขนาดใหญ่พอเหมาะกับค่าเฉลี่ยของรังสีแสงอาทิตย์ที่ได้รับในแต่ละวัน และเพียงพอที่จะจ่ายให้โหลดได้ตลอดทั้งคืน ถ้าหากเราต้องการวิเคราะห์ระบบที่มีความจุการสะสมพลังงานต่ำกว่าที่จำเป็นสำหรับการเก็บสะสมใน 1 วัน หรือถ้าเราต้องการทราบว่าเมื่อไหร่จะเกิดขึ้นบ้างภายใน 1 วัน ในแง่ของการแลกเปลี่ยนกำลังงานระหว่างระบบย่อยต่าง ๆ เหล่านี้วิธีการทำดุลพลังงานจะใช้ไม่ได้ผล

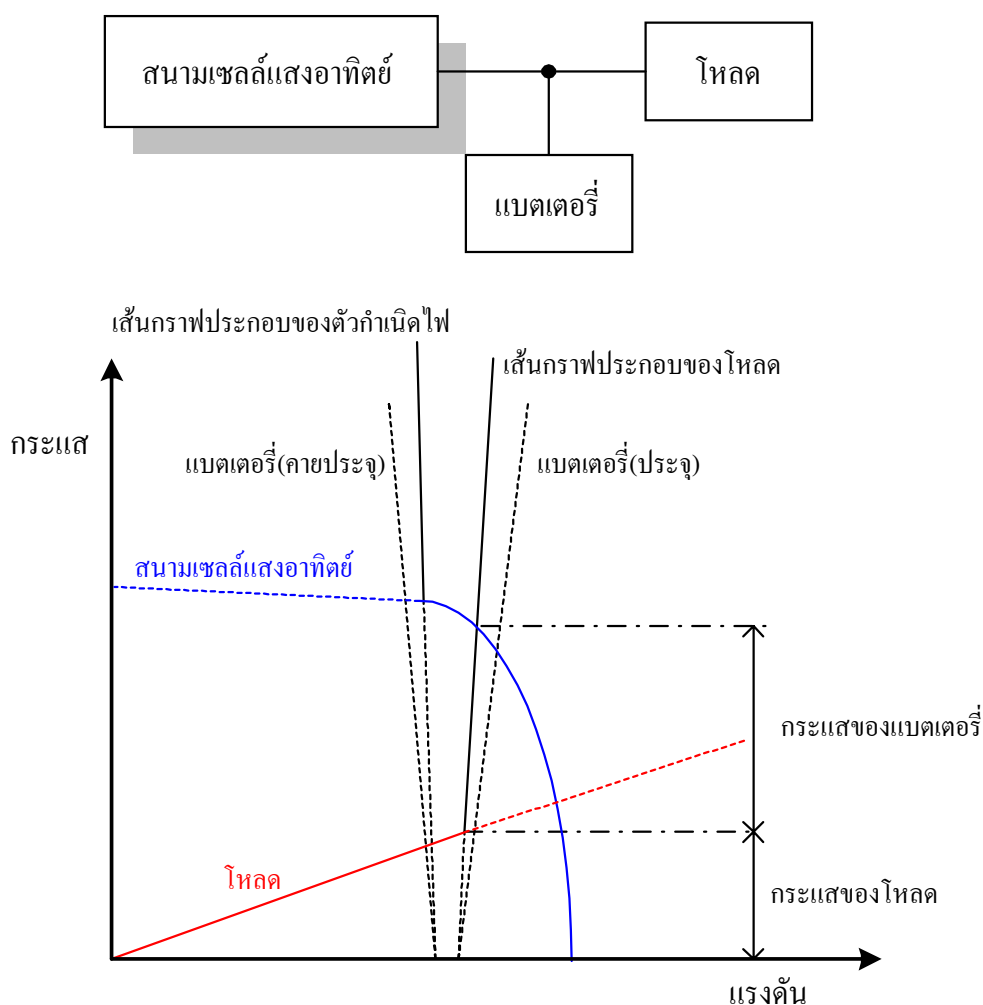
นอกจากนี้ยังมีกรณีอื่น ๆ อีกที่น่าสนใจเกี่ยวกับความสัมพันธ์ของกระแส และแรงดันระหว่างระบบย่อย เช่น กรณีที่จำเป็นต้องพิจารณาถึงแรงดันในการทำงานของสนามเซลล์แสงอาทิตย์ และความคู่ควรกันของเซลล์แสงอาทิตย์กับแบตเตอรี่

4.2.1 ความคู่ควรกันระหว่างสนามเซลล์แสงอาทิตย์กับแบตเตอรี่

พิจารณารูปแบบระบบอย่างง่ายอย่างในรูป 4.1 แบตเตอรี่ต่อขนานอยู่กับโหลดและสนามเซลล์แสงอาทิตย์ ไดโอดที่ต่ออนุกรมกับสนามเซลล์แสงอาทิตย์ใช้สำหรับกันมิให้กระแสไฟจากแบตเตอรี่ไหลย้อนกลับเข้ามายังเซลล์แสงอาทิตย์ ขณะที่แรงดันสูงสุดของสนามเซลล์แสงอาทิตย์ต่ำกว่าของแบตเตอรี่ (เช่น ในช่วงกลางคืน) การทำงานของระบบขึ้นกับภาวะความสมดุลของกระแสที่จุดต่อร่วมของระบบ โดยแรงดันจะอยู่ได้ที่อิทธิพลของแบตเตอรี่

$$I_{PV} = I_{Battery} + I_{Load} \quad (4.1)$$

กระแสแบตเตอรี่คิดเป็นบวกถ้ามันไหลเข้าแบตเตอรี่ และเป็นลบเมื่อไหลออกจากแบตเตอรี่ ในทางปฏิบัติอาจนับว่าแบตเตอรี่คล้ายกับเป็นโหลดตัวหนึ่งที่ต่อขนานกับโหลดจริง ๆ ถ้ามันกำลังอยู่ในสถานะการประจุ บางครั้งอาจพิจารณาว่าเป็นตัวกำเนิดไฟ ถ้ามันกำลังคายประจุให้โหลดอยู่



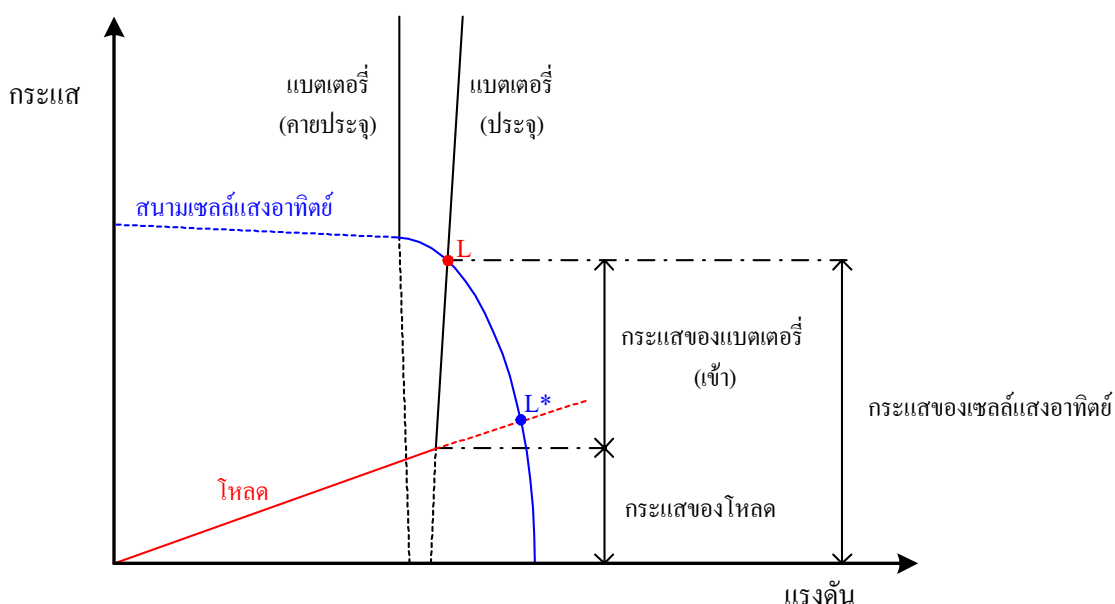
รูปที่ 4.1 การใช้กราฟวิเคราะห์ระบบที่ประกอบด้วยเซลล์แสงอาทิตย์กับแบตเตอรี่

เนื่องจากสถานะการทำงานของแบตเตอรี่อาจเป็นไปได้ทั้งสองแบบ จึงสมควรที่จะรวมเส้นกราฟ I-V ของตัวกำเนิดไฟและโหลดทั้งหลาย แล้วใช้เส้นกราฟ I-V ของแบตเตอรี่ทั้งตอนกำลังประจุและคายประจุ การสร้างกราฟดังกล่าวแสดงในรูป 4.1 ลักษณะเฉพาะประกอบของ

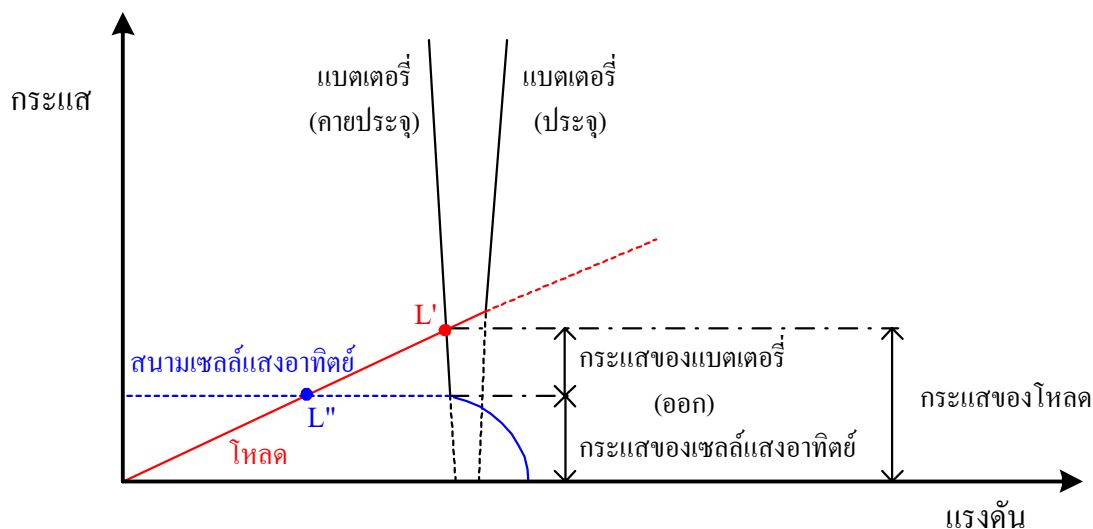
โหลดหาได้จากการรวมกระแสโหลด I_L และกระแสจากการประจุแบตเตอรี่ I_B (คิดในแต่ละค่าแรงดัน) ผลของการพล็อตขึ้นกับความต้องการของโหลดขณะแรงดันต่ำกว่าแรงดันวงจรเปิดของแบตเตอรี่ ส่วนที่แรงดันสูงกว่ามันจะขึ้นกับเส้นกราฟ I-V ของแบตเตอรี่ ในทำนองเดียวกันเราอาจพล็อตเส้นกราฟ I-V ประกอบของตัวกำเนิดไฟ โดยการรวมกระแสของสนามเซลล์แสงอาทิตย์ I_{PV} กับกระแสจากการคายประจุของแบตเตอรี่ (คิดในแต่ละค่าแรงดัน)

จุดตัดที่เกิดจากกราฟของตัวกำเนิดตัดกับกราฟของโหลด เรียกว่า “จุดทำงาน” ของระบบ สำหรับแต่ละภาวะของรังสีแสงอาทิตย์ และสถานะของการประจุแบตเตอรี่ ในรูป 4.1 แสดงถึงกรณีที่สนามเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตไฟมีกำลังสูงเกินกว่าความต้องการของโหลด และกำลังไฟส่วนเกินจะสะสมไว้ในแบตเตอรี่ ในรูป 4.3 กำลังไฟที่โหลดต้องการใช้สูงเกินกว่าที่สนามเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ แบตเตอรี่จะช่วยจ่ายไฟชดเชยให้โหลดแทน

แรงดันคล่อมโหลดก่อนข้างจะคงตัวดังจุด L ในรูป 4.2 และจุด L ในรูป 4.3 ถ้าปราศจากแบตเตอรี่แรงดันโหลดจะแปรจากจุด L^* (รูป 4.2) ไปยังจุด L^* (รูป 4.3) ดังนั้นแบตเตอรี่ในระบบพอจะยอมรับแรงดันของโหลดที่ยังคงค่าอยู่ในช่วงขีดจำกัดการแปรปรวนของแรงดันแบตเตอรี่ ยิ่งกว่านี้ถ้าหากเลือกขนาดแบตเตอรี่ได้พอเหมาะก็จะทำให้การใช้ประโยชน์จากกำลังไฟที่สนามเซลล์ผลิตได้สมบูรณ์ขึ้นไม่ว่าจะเป็นตอนกลางคืน หรือในวันที่มีเมฆมาก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความถูกต้องในการออกแบบขนาดของแบตเตอรี่



รูปที่ 4.2 ระบบที่ประกอบด้วยสนามเซลล์แสงอาทิตย์กับแบตเตอรี่ การสร้างกราฟเพื่อหาจุดทำงาน ขณะที่สนามเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายไฟเข้าประจุแบตเตอรี่ และจ่ายให้โหลดในเวลาเดียวกัน



รูปที่ 4.3 จุดทำงานของระบบที่ประกอบด้วยสนามเซลล์แสงอาทิตย์และแบตเตอรี่ขณะที่รังสีแสงอาทิตย์มีค่าต่ำ

เมื่อพิจารณาการทำงานตลอด 24 ชั่วโมง โดยการวิเคราะห์ห้วงจรง่าย ๆ ที่มีแบตเตอรี่ชนิดอุดมคติคือเส้นกราฟ I-V อยู่ในแนวตั้ง (แรงดันไม่ตกเมื่ออยู่ในสถานะประจุหรือคายประจุ) สมมุติว่ามีโหลดคงตัว 14Ω สนามเซลล์ประกอบด้วยแผงเซลล์ 4 แผงขนานกัน แบตเตอรี่มีแรงดัน 16 V ดังนั้นจุดทำงานไม่ว่าจะมีความรับอาบรังสีเท่าใดจะอยู่ใกล้ ๆ กับโลกซ์ของจุดกำลังสูงสุด จากสมมุติฐานว่าอุณหภูมิของเซลล์คงตัวเราได้เส้นกราฟ I-V ชั่วโมงต่อชั่วโมง และได้แผนภาพรายชั่วโมงของกระแสโหลดและแบตเตอรี่ โดยหาจากกราฟในรูป 4.4 แผนภาพเหล่านี้แสดงในรูป 4.5 จะเห็นได้ว่ากระแสที่สนามเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้สูงเกินกว่าที่โหลดต้องการระหว่างเวลา 6.40 น. และ 17.00 น. ในช่วงเวลานั้นกระแสแบตเตอรี่เป็นบวก (ประจุ) นอกเวลานั้นกระแสแบตเตอรี่เป็นลบ (คายประจุ) จนกระทั่งดวงอาทิตย์ลับขอบฟ้ากระแสจะคงอยู่ที่ค่าสูงสุดตามที่โหลดต้องการ

เราจะต้องตรวจสอบให้แน่ใจว่า

- 1) แบตเตอรี่สามารถจ่ายไฟให้โหลดได้ตลอดคืน
- 2) ช่วงกลางวันสนามเซลล์แสงอาทิตย์สามารถจ่ายไฟเก็บไว้ในแบตเตอรี่ได้เพียงพอที่จะจ่ายให้โหลดในช่วงคืนนับรวมการสูญเสียด้วย

เงื่อนไข ข้อ 1) เป็นการแสดงขนาดของแบตเตอรี่เพราะว่ามันจะต้องมีความจุไฟอย่างน้อยเท่ากับผลคูณของกระแสโหลดกับเวลาในช่วงกลางคืน (เป็นชั่วโมง) ในทางปฏิบัติความยาวในช่วงเวลากลางคืนเปลี่ยนแปลงตลอดปี ให้ใช้ช่วงกลางคืนที่ยาวที่สุด (เพื่อให้หมดปัญหากรณี

เลวร้ายที่สุด) เมื่อเลือกขนาดความจุแบตเตอรี่ได้ แล้วต่อไปจะต้องออกแบบขนาดของสนามเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งได้รับพลังงานเพียงพอในตอนกลางวันเข้าประจุแบตเตอรี่ สำหรับการวิเคราะห์ในวันที่แสดงในรูป 4.4 จะมีสนามเซลล์เพียงขนาดเดียวเท่านั้นที่ยอมให้พื้นที่ของการปล่อยกระแสบวกของแบตเตอรี่เท่ากับกระแสลบพอดี แต่ความรับอาบรังสีแสงอาทิตย์ไม่คงตัวตลอดปี ดังนั้นเพื่อให้การคำนวณถูกต้องจะต้องทำตลอดทั้งปีแล้วจึงเลือกขนาดของสนามเซลล์แสงอาทิตย์และแบตเตอรี่จากการประเมินนั้น

การใช้แบตเตอรี่ในระบบเซลล์แสงอาทิตย์ทำให้การทำงานของสนามเซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพดีขึ้น ทั้งนี้ขึ้นกับพฤติกรรมของส่วนประกอบ (โหลด + แบตเตอรี่) ระหว่างโหลดกับเส้นกราฟ I-V ซึ่งอาจเลือกให้ใกล้กับจุดโลดักของจุดกำลังสูงสุด ตำแหน่งของลักษณะเฉพาะของโหลดบนเส้น I-V ของสนามเซลล์จะขึ้นกับแรงดันแบตเตอรี่เป็นสำคัญ สารสำคัญคือจะต้องคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงของแรงดันแบตเตอรี่ซึ่งขึ้นอยู่กับสถานะการประจุของมัน และการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่พอเหมาะของสนามเซลล์แสงอาทิตย์ขณะอุณหภูมิเซลล์สูงสุด และความรับอาบรังสีสูงสุด

4.2.2 ระบบซึ่งประกอบด้วยแบตเตอรี่และตัวเปลี่ยนไฟดีซี-ดีซี

เมื่อมีตัวเปลี่ยนไฟดีซี-ดีซีแทรกระหว่างสนามเซลล์แสงอาทิตย์ และแบตเตอรี่ และถ้าใช้วงจรควบคุมแบบลอจิกที่เหมาะสมจะทำให้อัตราส่วนระหว่างแรงดันเข้าและออกเปลี่ยนไปในลักษณะที่ยังคงรักษาการทำงานของสนามเซลล์ให้อยู่ที่กำลังสูงสุดเสมอ แสดงการทำงานของตัวเปลี่ยนไฟดีซี-ดีซี ซึ่งตอนนี้จะเขียนเป็น

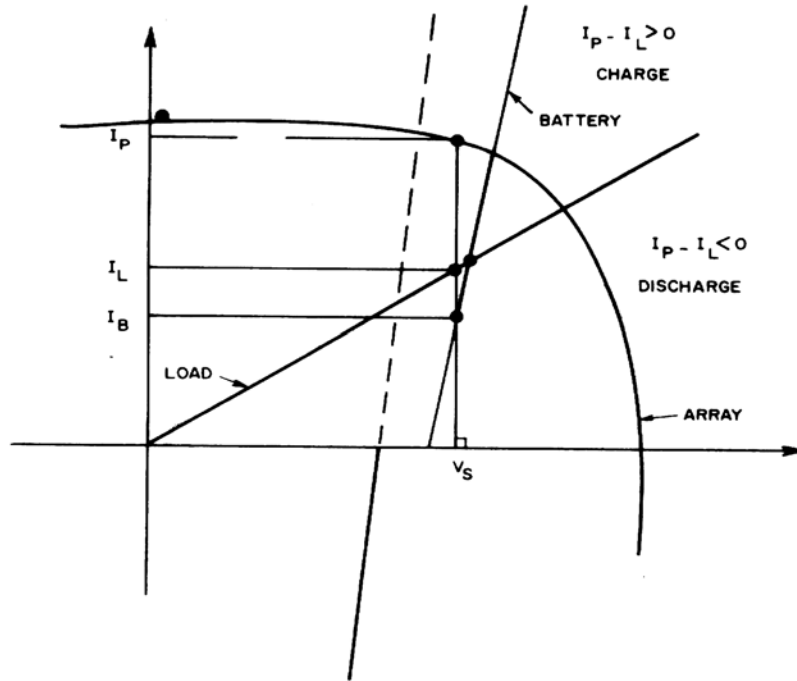
$$I_O = P_{P.V.} n_C(p) / V_B \quad (4.2)$$

ซึ่ง V_B เป็นแรงดันแบตเตอรี่และเป็นฟังก์ชันของสถานะการประจุ Q/Q_{max} และกระแส I_B

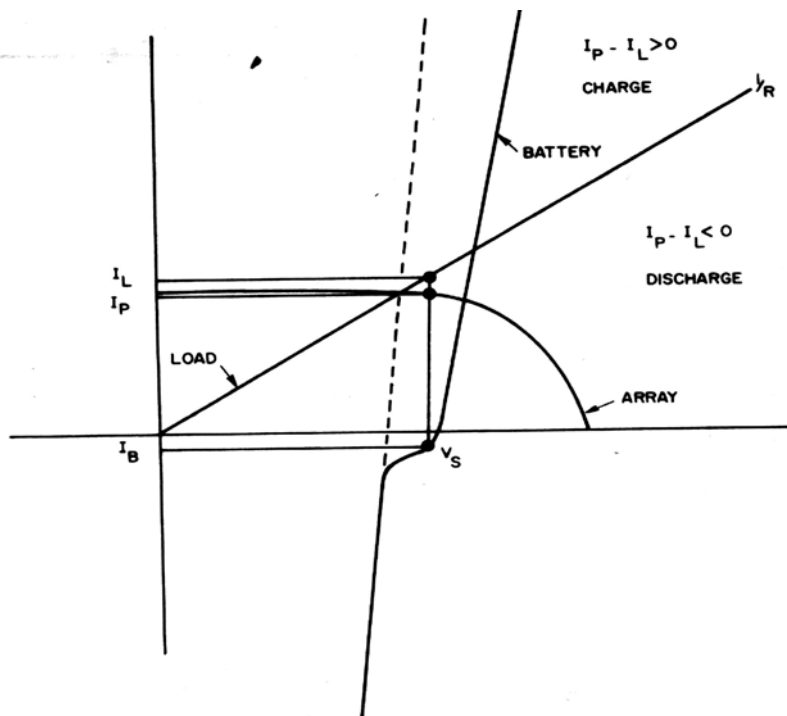
$$V_B = f\left(\frac{Q}{Q_{max}}, I_B\right) \quad (4.3)$$

และในโหลดมีกระแสไหล I_L

$$I_L = \frac{V_B}{R} \quad (4.4)$$



(ก)



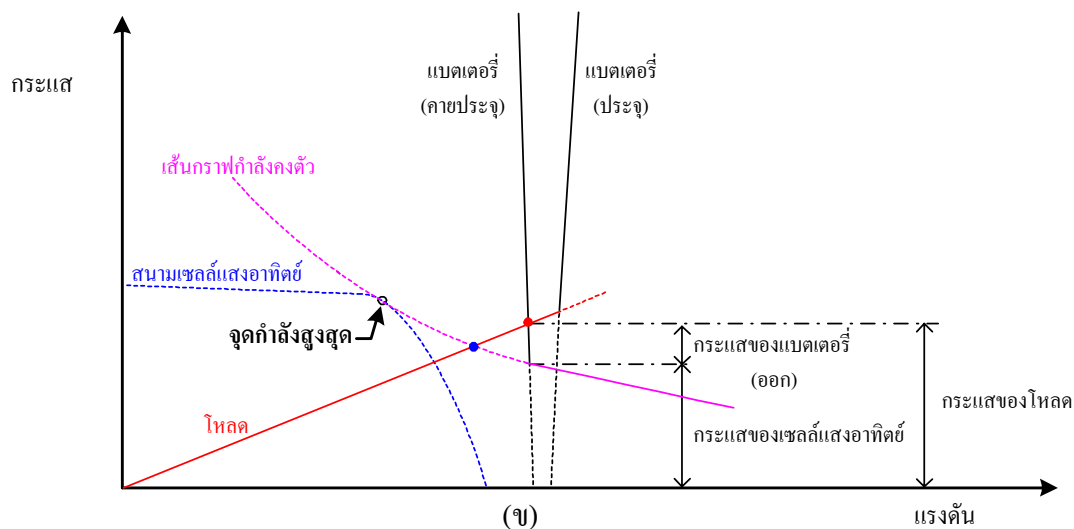
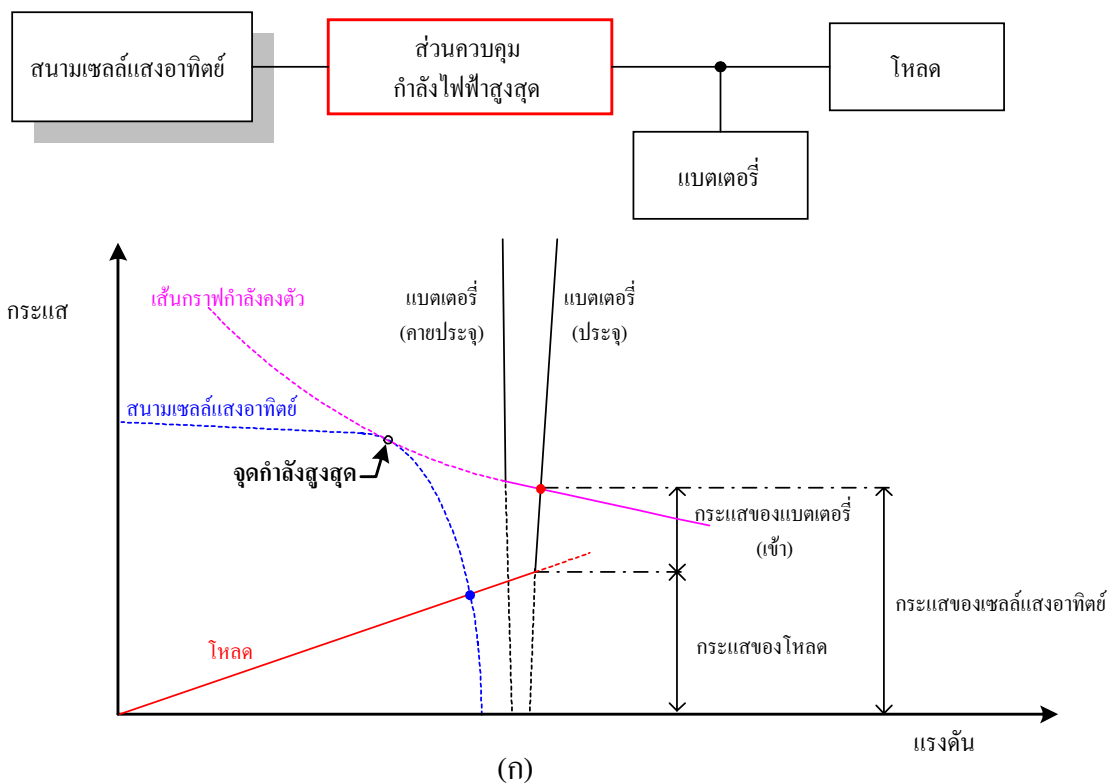
(ข)

รูปที่ 4.4 การหาจุดทำงานของระบบที่มีแบตเตอรี่อุดมคติ

- ก) รังสีแสงอาทิตย์สูง สานามเซลล์แสงอาทิตย์สามารถจ่ายไฟเข้าประจุแบตเตอรี่และโหลด
- ข) รังสีแสงอาทิตย์ต่ำ สานามเซลล์แสงอาทิตย์ไม่สามารถจ่ายไฟให้โหลด แบตเตอรี่ต้องคายประจุให้โหลด

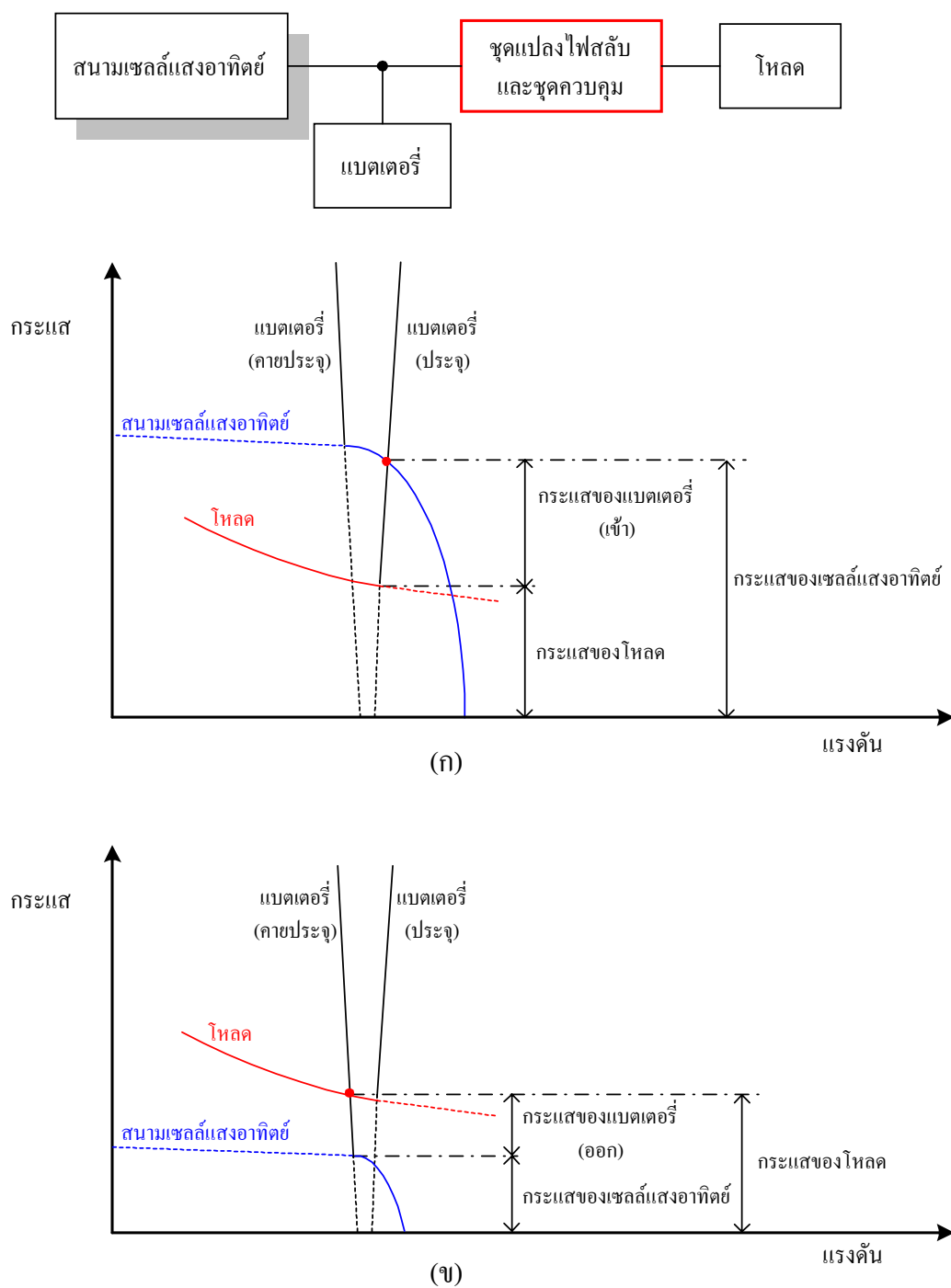
รูปที่ 4.5 แผนภาพรายชั่วโมงของกระแสโหลด และแบตเตอรี่ตลอด 24 ชั่วโมง

เงื่อนไขการสมดุลระหว่างกระแสที่จุดต่อร่วมของระบบ เขียนไว้ในรูป 4.6 ส่วนขั้นตอนอื่น ๆ จะคล้ายกับที่ได้บรรยายไว้ในตอนที่แล้ว ในกรณีนี้กราฟที่ประกอบกันของตัวกำเนิดไฟได้มาจากการรวมกระแสของแบตเตอรี่ (การคายประจุ) และกระแสออกของตัวเปลี่ยนไฟดีซี-ดีซี ที่แต่ละแรงดัน เช่น กราฟไฮเปอร์โบลาในระนาบ $I-V$ ลักษณะเฉพาะประกอบของโหลดคล้ายกับที่แสดงในตอนก่อน จุดตัดระหว่างเส้นกราฟทั้งสองแสดงจุดการทำงานที่แท้จริง



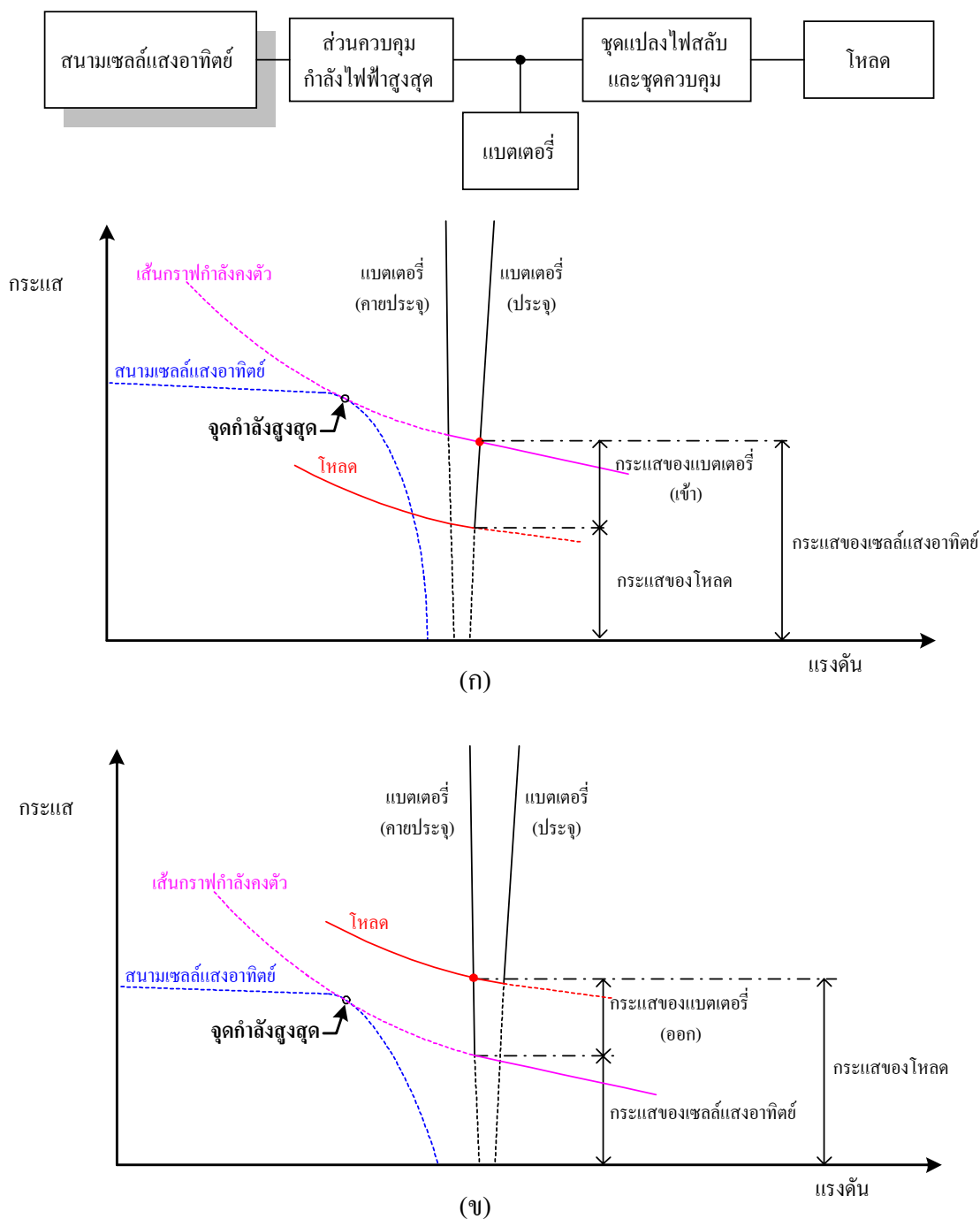
รูปที่ 4.6 การวิเคราะห์ระบบที่ประกอบด้วยตัวติดตามควบคุมการทำงานที่จุดกำลังสูงสุด (maximum power tracker)

- ก) รังสีแสงอาทิตย์สูง สนามเซลล์แสงอาทิตย์สามารถจ่ายไฟเข้าประจุแบตเตอรี่และโหลด
- ข) รังสีแสงอาทิตย์ต่ำ สนามเซลล์แสงอาทิตย์ไม่สามารถจ่ายไฟให้โหลด แบตเตอรี่ต้องคายประจุให้โหลด



รูปที่ 4.7 การวิเคราะห์ในระบบที่มีตัวคุมค่าแรงดันออก

- ก) รังสีแสงอาทิตย์สูง สนามเซลล์แสงอาทิตย์สามารถจ่ายไฟเข้าประจุแบตเตอรี่และโหลด
- ข) รังสีแสงอาทิตย์ต่ำ สนามเซลล์แสงอาทิตย์ไม่สามารถจ่ายไฟให้โหลด แบตเตอรี่ต้องคายประจุให้โหลด



รูปที่ 4.8 การวิเคราะห์ในระบบที่มีแบตเตอรี่ ตัวติดตามควบคุมจุดกำลังสูงสุด และตัวคุมค่าแรงดันออก

- ก) รังสีแสงอาทิตย์สูง สนามเซลล์แสงอาทิตย์สามารถจ่ายไฟเข้าประจุแบตเตอรี่และโหลด
- ข) รังสีแสงอาทิตย์ต่ำ สนามเซลล์แสงอาทิตย์ไม่สามารถจ่ายไฟให้โหลด แบตเตอรี่ต้องคายประจุให้โหลด

4.2.3 ระบบประกอบด้วยตัวคุมค่าแรงดันบนโหลด

ถ้าโหลดมีตัวคุมค่าแรงดันเพื่อรักษาระดับแรงดันคงตัวคล่อมอยู่ หรือถ้ามีตัวเปลี่ยนไฟสลับคั่นอยู่ระหว่างแบตเตอรี่และโหลดซึ่งมีการคุมค่าแรงดันออกของโหลด การพิจารณาโหลดจะคิดจากกำลังไฟที่โหลดได้ใช้ไปเท่านั้น ส่วนตัวคุมค่าแรงดันแสดงด้วยประสิทธิภาพ η_{VR} ในการทำงานของมันประสิทธิภาพจะเป็นฟังก์ชันของกำลังส่งผ่าน และในเส้นกราฟนี้เรายังสามารถพิจารณาประสิทธิภาพของตัวทำไฟสลับได้อีกด้วย (ถ้ามีตัวทำไฟสลับอยู่)

รูปแบบระบบที่เป็นไปได้สองแบบแสดงในรูป 4.7 และ 4.8 ซึ่งสามารถวิเคราะห์ในทำนองเดียวกันกับตอนก่อน ๆ เพียงแต่มีความแตกต่างกันในเส้นกราฟของโหลดที่ประกอบกัน ซึ่งขณะนี้ให้คิดเป็นกำลังคงตัว P_L ที่โหลดต้องการ ดังความสัมพันธ์

$$I_L = P_L / \eta_{VR} (P_L) / V_B \quad (4.5)$$

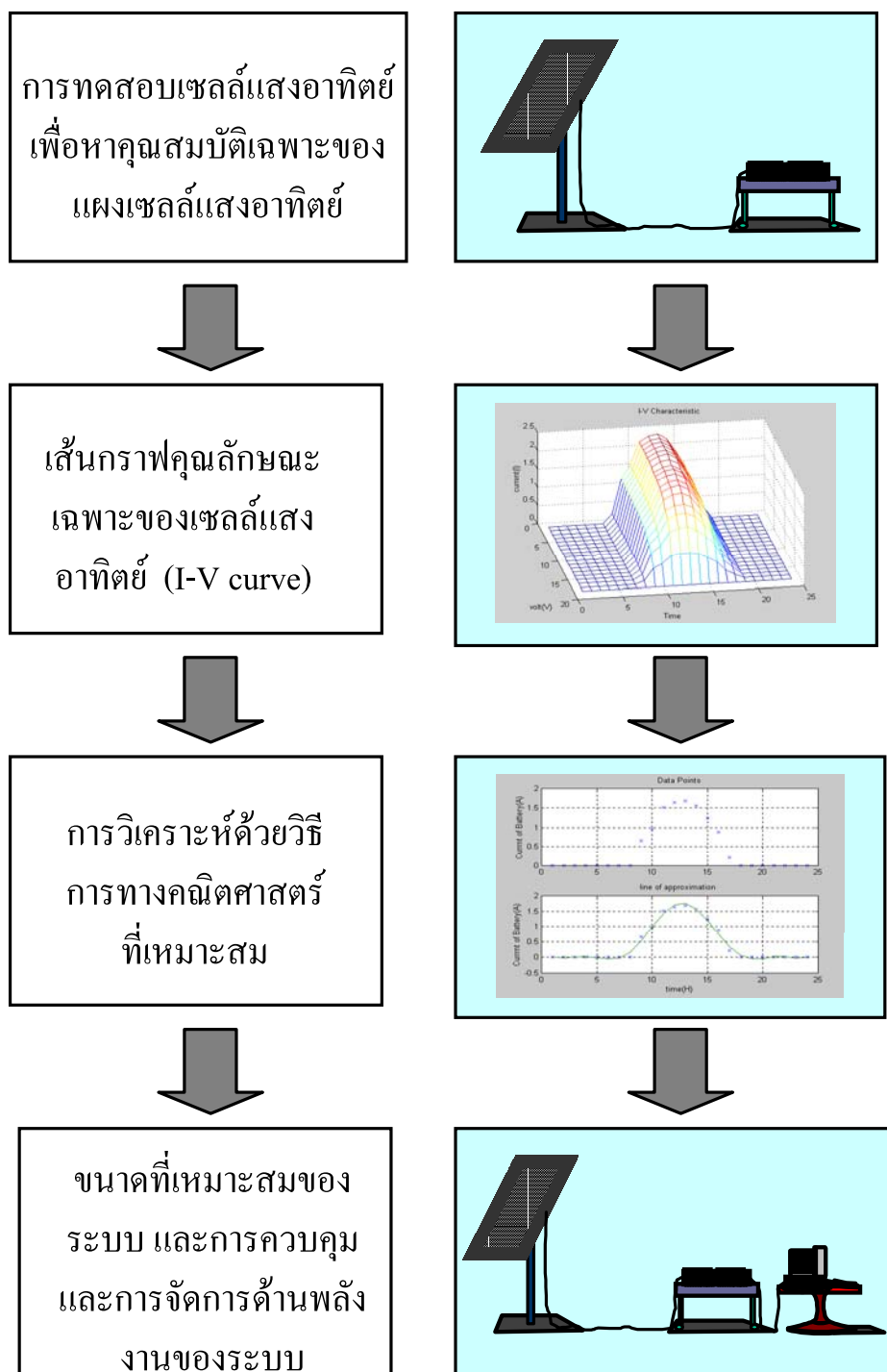
ซึ่งต้องรวม I_L เข้ากับกระแสแบตเตอรี่ I_B จุดตัดของเส้นกราฟประกอบของโหลดกับเส้นกราฟของตัวกำเนิดให้จุดทำงานดังเช่นเคย การสร้างกราฟแสดงในรูป 4.7 สำหรับระบบที่ปราศจากตัวเปลี่ยนไฟดิซี-ดิซี และรูป 4.8 สำหรับระบบที่มีตัวเปลี่ยนไฟดิซี-ดิซี

4.3 การสร้าง และทดสอบโปรแกรมจำลองการทำงานของระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์

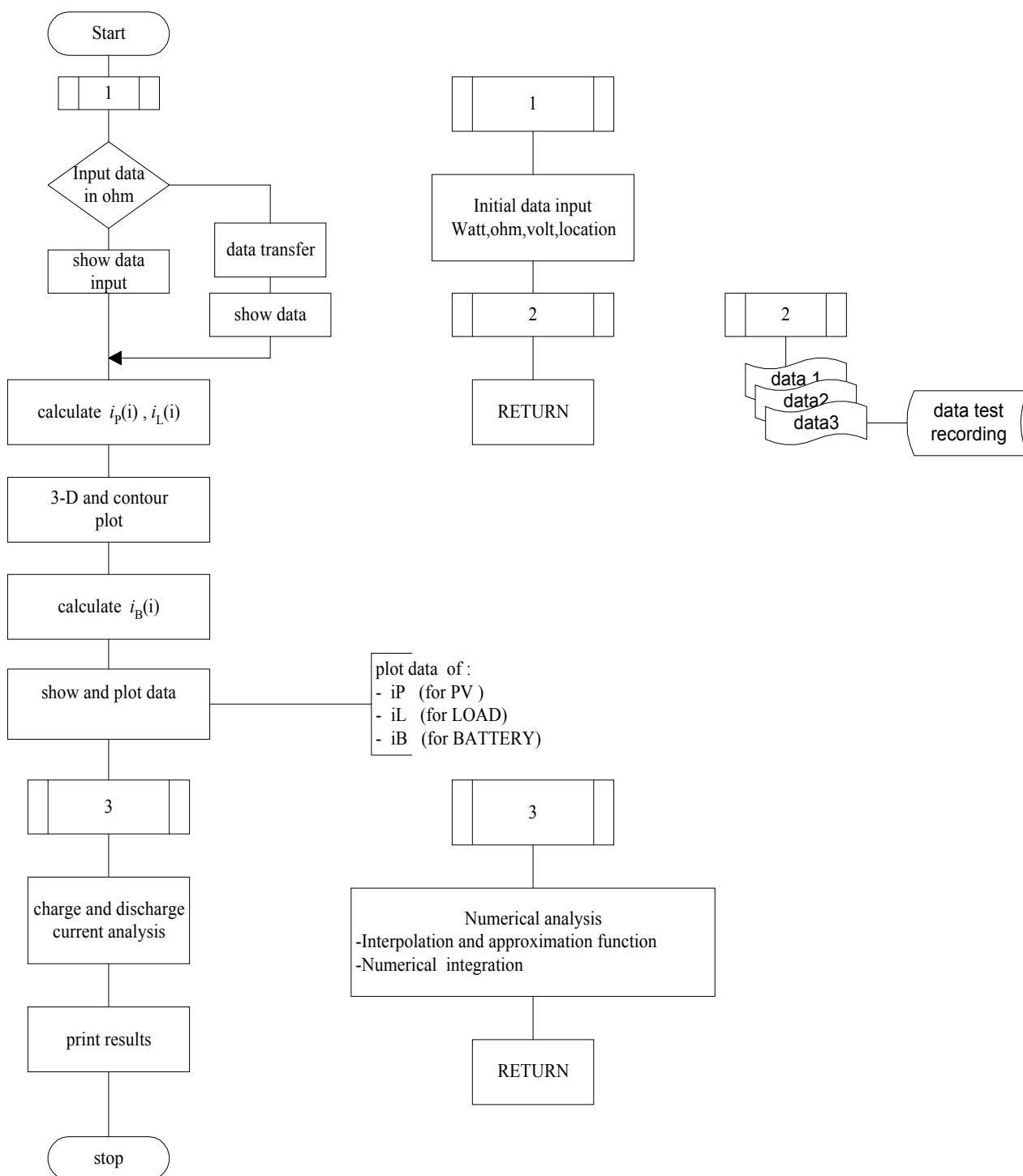
4.3.1 การทำงานของโปรแกรม

การคิดคำนวณของโปรแกรมจะอาศัยระบบฐานข้อมูลของ กระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าจากการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่เก็บบันทึกไว้มาทำการวิเคราะห์ และคำนวณค่า โดยแสดงขั้นตอนการดำเนินการในแต่ละส่วนไว้ในรูปที่ 4.9 [21] และสามารถแสดงลำดับขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมจำลองการทำงาน และวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ ได้ดังรูปที่ 4.10 สำหรับกรณีที่เป็นการจำลองระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์โดยพิจารณาผลของโหลดการระร่วมด้วยนั้น[22] เมื่อเริ่มทำงานโปรแกรมจะให้ผู้ใช้ป้อนค่าพารามิเตอร์หรือตัวแปรที่ต้องการจำลองการใช้งานของระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ อันได้แก่ ขนาดพิคคของโหลดการะ และ ระดับแรงดันใช้งาน เป็นต้น

ส่วนกรณีที่เป็นกรจำลองการทำงานของระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ที่ไม่มีการพิจารณาผลของโหลดการะผู้ใช้จะป้อนค่าเฉพาะ ระดับแรงดันใช้งานของระบบเท่านั้น

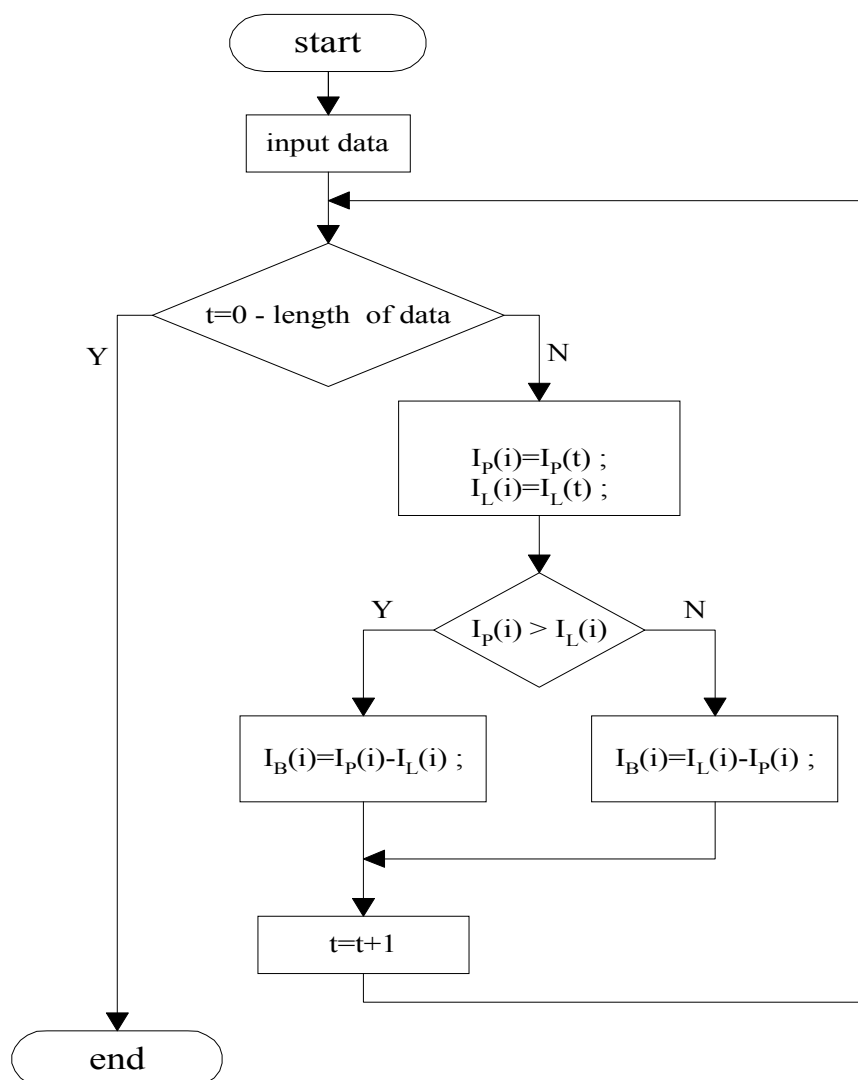


รูปที่ 4.9 ลำดับขั้นตอนการดำเนินงานในแต่ละส่วนสำหรับวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ตามวิธีการที่นำเสนอ

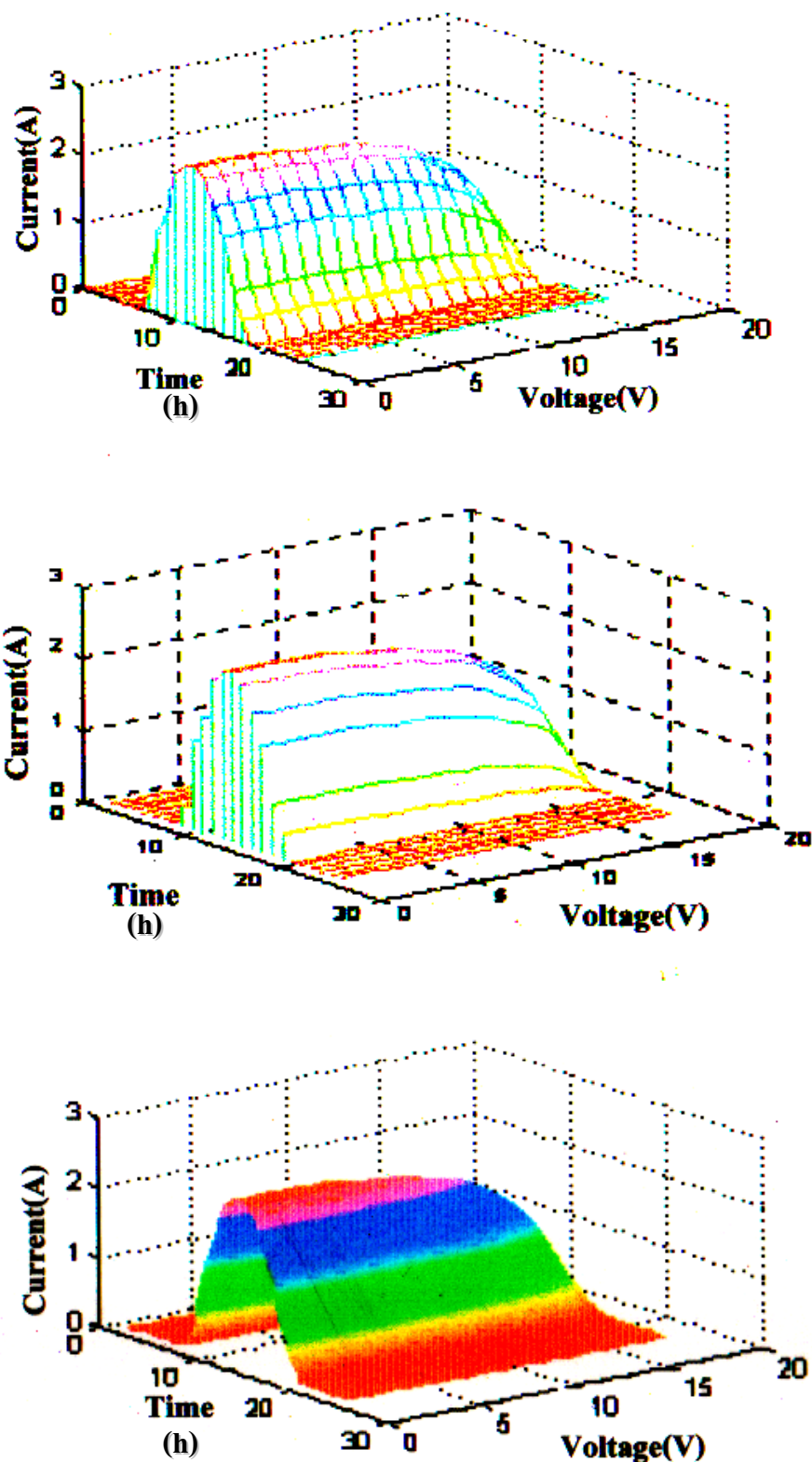


รูปที่ 4.10 ลำดับขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมจำลองการทำงาน และวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์

เมื่อรับเป็นค่าอินพุตสำหรับคำนวณการจำลองระบบเข้ามาแล้ว โปรแกรมจะทำการอ่านค่าอินพุตดังกล่าว พร้อมทำการปรับเปลี่ยนค่า และจัดรูปแบบที่เหมาะสมให้สามารถนำไปใช้ในการคำนวณค่าต่อไปได้ จากนั้นเมื่อมีการจัดรูปแบบและปรับเปลี่ยนค่าแล้ว โปรแกรมจะทำการคำนวณกระแสไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ($I_{PV(i)}$) และกระแสไฟฟ้าของโหลดภาระ ($I_{L(i)}$) ที่แต่ละค่าในแต่ละช่วงเวลา ณ. ที่จุดแรงดันใช้งานของระบบ โดยจะทำการวนรอบการทำงานตามจำนวนข้อมูลที่ได้ทำการบันทึกค่าไว้จนครบทุกช่วงเวลา(ดูการทำงานได้จากรูปที่ 4.11) จากนั้นโปรแกรมจะทำการแสดงค่าข้อมูลที่ได้รับมา[23] ซึ่งได้มาจากการทดสอบและเก็บข้อมูลไว้แสดงออกทางจอภาพในลักษณะของรูปพื้นผิวร่างแหแบบ 3 มิติ (3-D mesh plot) และพล็อตเป็นเส้นโครงร่าง(contour) ออกมา ดังรูปที่ 4.12



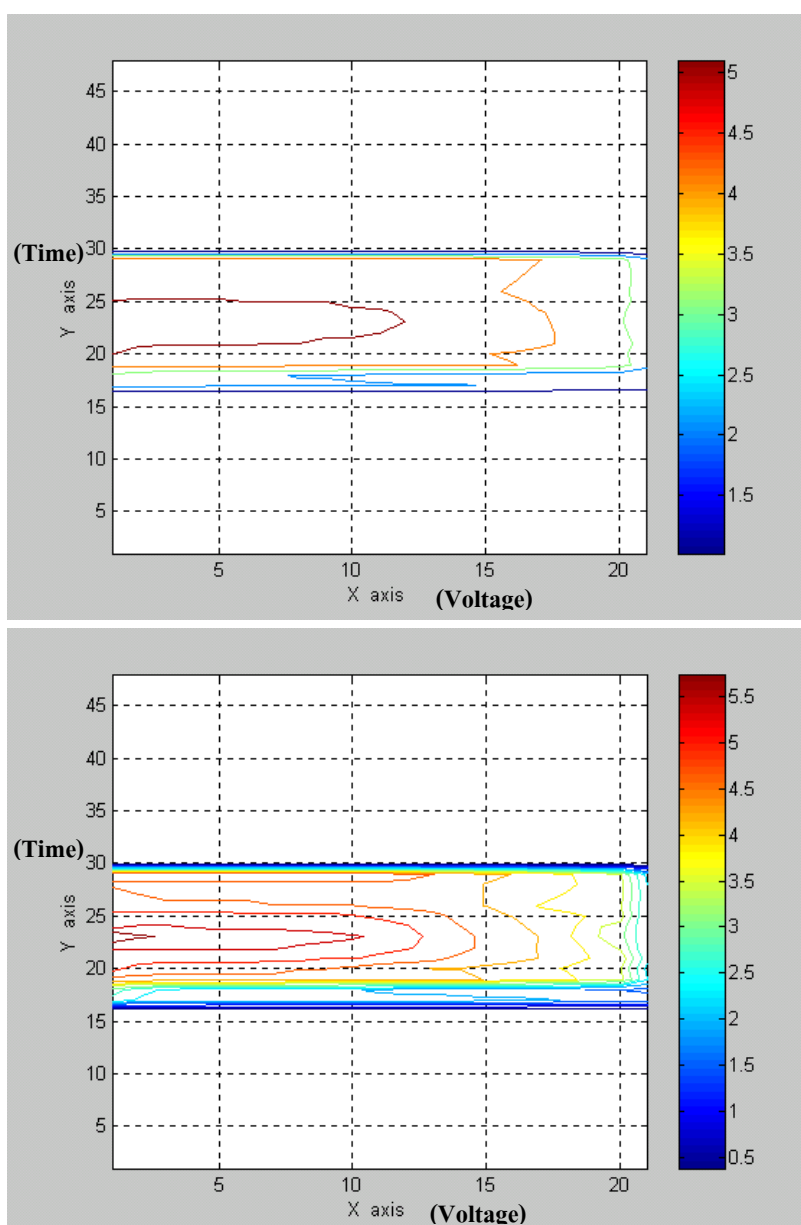
รูปที่ 4.11 ลำดับขั้นตอนการคำนวณค่ากระแสที่แต่ละส่วนของระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์



รูปที่ 4.12 ผลการแสดงผลในลักษณะรูปพื้นผิวโครงร่าง 3 มิติ ในลักษณะต่างๆจากข้อมูลการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์

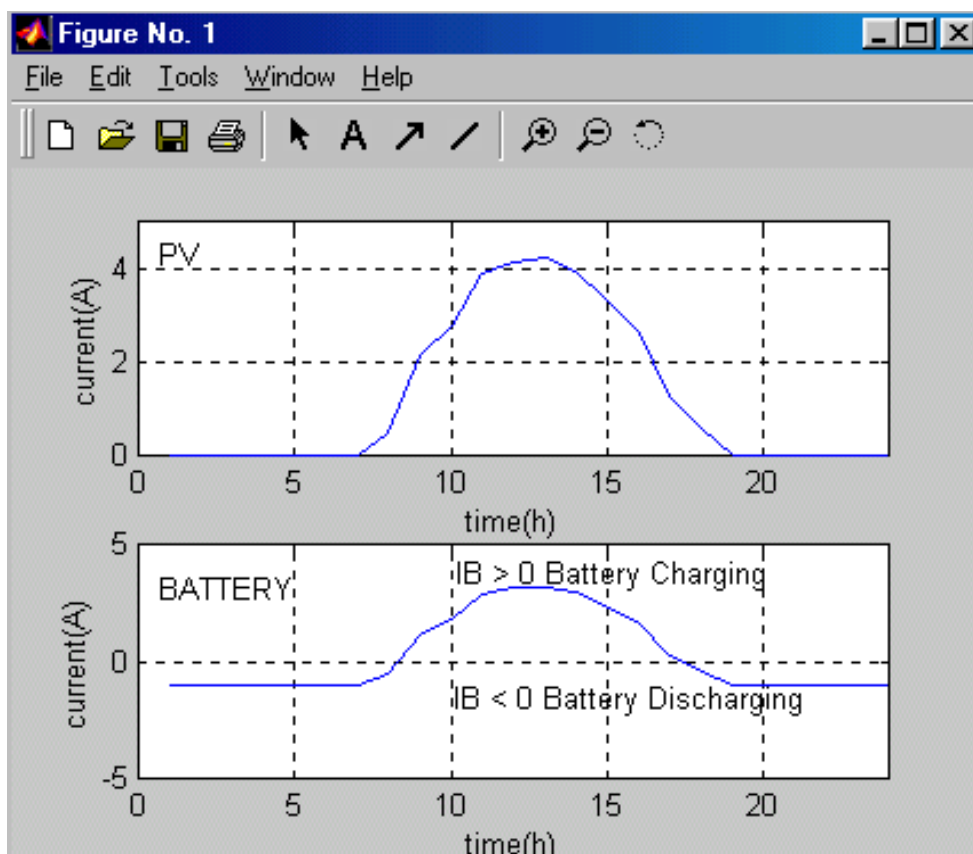
ซึ่งผู้ใช้สามารถที่จะเปลี่ยนมุมมองในการมองภาพ และแสดงภาพไปที่ค่าต่าง ๆ ได้ด้วยการกำหนดมุมกวาด (Azimuth) สำหรับหมุนภาพทวนเข็ม (+) หรือตามเข็ม(-) นาฬิกา และกำหนดเป็นมุมยก (Elevation) สำหรับการยกภาพขึ้น (+) และกดภาพลง(-) สำหรับกรณีของการplotแบบพื้นผิวร่างแห (mesh)

ส่วนการplotเป็นเส้นโครงร่าง (Contour) ที่แสดงดังรูปที่ 4.13 ผู้ใช้ก็สามารถกำหนดจำนวนเส้นเพื่อแสดงผลต่างที่แต่ละระดับของการแสดงเป็นเส้นโครงร่างได้เช่นกัน



รูปที่ 4.13 ผลการแสดงค่าในลักษณะของเส้นโครงร่าง

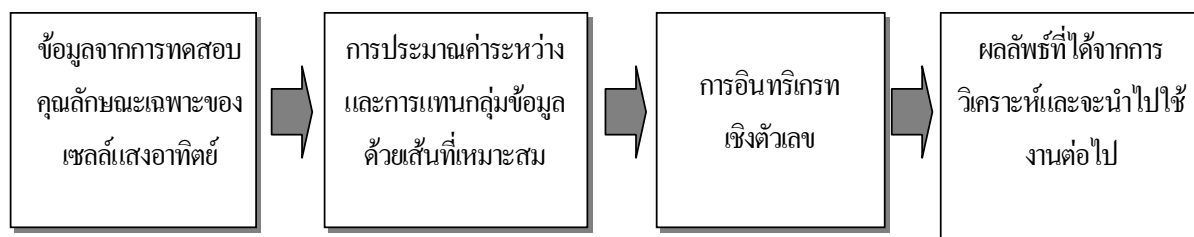
จากนั้นโปรแกรมจะทำการแสดงค่าต่าง ๆ และพล็อตกราฟเพื่อแสดงถึงการทำงานของระบบย่อยต่าง ๆ อันได้แก่ กระแสไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (I_{PV}) กระแสไฟฟ้าของโหลดภาระ (I_L) และการดำเนินการของแบตเตอรี่ที่เวลาต่าง ๆ ในแต่ละช่วงเวลาของวันออกมามีดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 ผลการแสดงผลกระแสไฟฟ้าที่แต่ละส่วนของระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์

4.3.2 การวิเคราะห์เชิงตัวเลข

หลังจากที่โปรแกรมทำการแสดงค่าผลลัพธ์ต่างในรูปของกราฟแล้ว โปรแกรมจะทำการนำค่าที่ได้ไปทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีการเชิงตัวเลขโดยมีลำดับขั้นตอนในการวิเคราะห์แสดงได้ดังรูปที่ 4.15 ด้วยการนำค่าที่ได้ไปทำการหาค่าแทรก และทำการประมาณค่าด้วยฟังก์ชันที่เหมาะสม (Interpolation and approximation function) ซึ่งความละเอียดถูกต้องก็ขึ้นกับจำนวนข้อมูล และอัตราการชักค่าของข้อมูล (Sampling Date) ด้วยเช่นกัน ต่อจากนั้นโปรแกรมจะทำการอินทิเกรตด้วยวิธีการเชิงตัวเลข (Numerical Integration) เพื่อทำการหาพื้นที่ใต้กราฟซึ่งก็คือปริมาณกระแสไฟฟ้า หรือพลังงานไฟฟ้าที่แต่ละส่วนของระบบดังต่อไปนี้ [24]



รูปที่ 4.15 ลำดับขั้นการวิเคราะห์ด้วยวิธีการเชิงตัวเลข

การใช้ข้อมูลจากการทดลองเพื่อนำค่าที่ได้มาใช้ในการคำนวณต่อไป ค่าที่ได้จากการทดลองมักจะมีค่าที่จุดใดจุดหนึ่ง หรือหลายๆ จุด ซึ่งอาจไม่เหมาะสมในการนำไปใช้ในการคำนวณ ดังนั้นจึงต้องมีวิธีการทางคณิตศาสตร์เพื่อเปลี่ยนข้อมูลที่มีลักษณะเป็นกลุ่มของจุดออกมาให้เป็นฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ที่มีความต่อเนื่อง การเปลี่ยนข้อมูลเป็นฟังก์ชันสามารถกระทำได้โดยหลักใหญ่ๆ 2 กรณีคือการหาค่าแทรก และการประมาณค่าด้วยฟังก์ชันที่เหมาะสม (Interpolation and approximation function) ข้อแตกต่างของทั้ง 2 วิธีคือ สำหรับ interpolation นั้นฟังก์ชันจะผ่านทุกจุดของข้อมูล แต่ approximation function ไม่จำเป็นต้องเป็นเช่นนั้น นั่นคือค่าฟังก์ชัน อาจจะผ่านหรือไม่ผ่านจุดข้อมูลทุกจุดก็ได้แต่ควรจะเป็นฟังก์ชันที่ต่อเนื่อง และมีค่าใกล้เคียงกับทุกจุดมากที่สุด หรืออาจเป็นเส้นกราฟที่เหมาะสมที่สุดกับกลุ่มข้อมูลก็ได้ สำหรับวิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขที่ใช้ทั้งสองกรณีนี้นั้นมีหลายวิธีดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 แต่ในที่นี้จะพิจารณาเฉพาะบางกรณีที่มีการใช้งานในโปรแกรม Matlab ดังต่อไปนี้

1. การหาค่าแทรก วิธีที่ Matlab ใช้เป็นหลักคือ การหาค่าแทรกด้วยพหุนาม โดยเป็นการเชื่อมต่อข้อมูล 2 จุดที่อยู่ติดกันด้วยเส้นโค้งหรือเส้นตรงตามแต่ที่กำหนด ในกรณีที่กำหนดให้เป็นเส้นตรงจะเรียก Linear interpolation และ Cubic-Spline interpolation จะเป็นเส้นโค้งที่ได้จากพหุนามอันดับ 3 ที่เชื่อมต่อระหว่างจุด 2 จุด ที่อยู่ติดกันและนอกจากนั้นแล้วยังให้ ความชันของเส้นโค้งสองเส้นที่บรรจบกันที่จุดข้อมูลมีค่าเท่ากันหรือกล่าวอีกอย่างหนึ่งก็คือเส้น โค้งจะราบเรียบที่จุดต่อทั้งสองเส้นนั่นเอง
2. การปรับโค้ง วิธีการที่ Matlab ใช้คือ Least-Square Curve Fitting โดยจะเป็นวิธีที่เลือกเส้นโค้งที่เป็นพหุนามซึ่งมีอันดับ ตามที่ผู้ใช้งานต้องการ โดยเส้นโค้งจะผ่านกลุ่มข้อมูล โดยให้ผลรวมของระยะห่างจากข้อมูลแต่ละจุดห่างจากเส้นโค้งนี้น้อยที่สุด

สำหรับ linear interpolation จะเป็นการเชื่อมต่อจุดข้อมูลที่อยู่ติดกันด้วยเส้นตรง ดังนั้นการหาค่าของข้อมูลที่อยู่ระหว่างจุดทั้งสองก็จะใช้สมการเชิงเส้นของเส้นตรงที่เชื่อมจุดนั้นเป็นตัวกำหนด เหมือนกับที่เราใช้ในการเปิดตารางต่างๆ ทางวิศวกรรม สำหรับคำสั่งที่ใช้กับ Matlab จะใช้คำสั่ง interp1 โดยมีรายละเอียดดังนี้

`interp1 (x, y, s)` เป็นการหา linear interpolation ของชุดข้อมูล x และ y เมื่อ $y = y(x)$ โดยจะให้คำตอบเป็นค่าของ $y(s)$ โดย x และ y เป็นเวกเตอร์ ขนาดเท่ากัน ในกรณีที่ s เป็นเวกเตอร์ จะให้ค่าเป็นเวกเตอร์ ขนาดเท่า s

ข้อมูลที่ใช้ใน `interp1` ต้องมีการเรียงค่าของ x และ Matlab จะแนะนำให้เรียงค่า x จากน้อยไปหามาก ในกรณีที่ x และ y เป็นเมทริกซ์ ที่มีขนาดเท่ากัน Matlab จะจับคู่ของข้อมูลในลักษณะคอลัมน์ต่อ คอลัมน์ ดังนั้นในการใส่ข้อมูลจะต้องให้ความระมัดระวังด้วย

สำหรับกรณี Cubic Interpolation จะคล้ายกับ `spline` แต่ที่จุดต่อของเส้นโค้งไม่จำเป็นต้องราบเรียบ รูปแบบจะเป็นดังนี้

`interp1 (x, y, s, 'cubic')` โดย x, y และ s จะเหมือนกับที่ผ่านมา ส่วน string 'cubic' จะบอกให้ Matlab ทราบว่าต้องการทำ cubic interpolation

สำหรับ `spline` interpolation จะมีรูปแบบฟังก์ชันเป็น

`interp1 (x, y, s, 'spline')` ค่า x, y และ s จะเหมือนกับที่ผ่านมา ส่วน string 'spline' จะบอกให้ Matlab ทราบว่าต้องการใช้วิธี cubic spline interpolation

สำหรับการเรียกใช้ `spline` นี้อาจจะใช้ได้อีกรูปแบบหนึ่งคือ

`spline (x, y, s)` ซึ่งจะให้ผลเหมือน `interp1 (x, y, s, 'spline')` เพียงแต่คำสั่ง `spline` รับแค่เฉพาะ x และ y ที่เป็นเวกเตอร์ เท่านั้น

`spline (x, y)` จะให้ 'piecewise polynomial' ที่ได้จากการหาค่าแทรกของชุดข้อมูล (x, y) โดยพหุนามจะอยู่ในรูป $y = y(x)$ ซึ่งเรียกพหุนามที่ได้ว่ามีรูปเป็น pp-form polynomial และหากต้องการหาค่าฟังก์ชันที่จุดใดอาจใช้คำสั่ง `ppvalue`

การประมาณค่าด้วยฟังก์ชันพหุนาม ที่เหมาะสม (polynomial approximation function) คือ การหาสมการพหุนามอันดับ n ที่เหมาะสมกับชุดกลุ่มข้อมูลที่สุดแม้ว่ากราฟนี้จะไม่ผ่านทุกจุดของข้อมูลแต่กราฟจะเป็นกราฟเพียงเส้นเดียว นั่นคือมีสมการกราฟเพียงสมการเดียวตลอดช่วงที่กำหนดให้ ซึ่ง พหุนาม จะมีรูปแบบเป็น

$$p(x) = a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \dots + a_2 x^2 + a_1 x + a_0 \quad (4.6)$$

โดยค่าสัมประสิทธิ์ a จะต้องเลือกให้เหมาะสมกับชุดข้อมูลที่สุด สำหรับการปรับโค้งด้วยค่ากำลังสองน้อยที่สุด เป็นการเลือกพหุนามในองศาที่กำหนด เพื่อที่จะผ่านกลุ่มข้อมูลที่กำหนด สำหรับหลักการที่ใช้ในการเลือกสัมประสิทธิ์ a_i นั้นจะเลือกค่าที่ให้กราฟที่ได้มีลักษณะที่มีผลรวมกำลังสองของระยะทางจากจุดต่างๆ ห่างจากเส้นกราฟน้อยที่สุด รายละเอียดของขั้นตอนการเลือก

สัมประสิทธิ์สามารถดูได้ในหัวเรื่องระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในบทที่ 3 ประกอบด้วย สำหรับคำสั่งใน Matlab จะมีรูปแบบคำสั่งเป็นดังนี้

`polyfit(x,y,n)` โดย x,y เป็นจุดข้อมูลที่ต้องการปรับโค้งด้วยพหุนามอันดับ n ซึ่ง Matlab จะให้สัมประสิทธิ์ของ พหุนาม $y = f(x)$ คืนมาโดยเรียงจากสัมประสิทธิ์ของกำลังมากไปหาน้อย

เมื่อได้ฟังก์ชันการประมาณค่าที่เหมาะสมแล้วโปรแกรมจะทำการอินทิเกรตด้วยวิธีการเชิงตัวเลข (Numerical Integration) เพื่อทำการหาพื้นที่ใต้กราฟซึ่งก็คือปริมาณกระแสไฟฟ้า หรือพลังงานไฟฟ้าที่แต่ละส่วนของระบบ ได้แก่ พลังงานที่สามารถผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ พลังงานที่โหลดภาระได้รับ และปริมาณกระแสไฟฟ้าในแต่ละช่วงการดำเนินการของแบตเตอรี่ ด้วยวิธีของ Simpson's และ higher-order Newton-Cotes ดังที่ได้กล่าวในรายละเอียด และแสดงการเปรียบเทียบของแต่ละวิธีการไว้ในบทที่ 3 ข้างต้น สำหรับคำสั่ง และเงื่อนไขการใช้งานในโปรแกรม Matlab สามารถพิจารณาได้ดังต่อไปนี้

การอินทิเกรตเชิงตัวเลข (Numerical Integration) นั้นมีวิธีการที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในสองกรณีคือ

- 1) ในกรณีที่เราได้ข้อมูลมาเป็นชุดของข้อมูล ซึ่งเราอาจจะต้องการอินทิเกรตโดยตรง โดยไม่ต้องการที่จะทำการหาค่าแทรก หรือ ปรับโค้งของข้อมูลก่อนแล้วจึงนำมาอินทิเกรตด้วยวิธีปกติ
- 2) ในกรณีที่มีฟังก์ชันที่ยุ่งยากต่อการอินทิเกรต ด้วยวิธี analytical แบบธรรมดาที่ใช้กันทั่วไป

การอินทิเกรตเชิงตัวเลขบนเครื่องคอมพิวเตอร์ความยุ่งยากในการหาผลลัพธ์จะลดน้อยลงไปกว่าวิธีการอินทิเกรตแบบปกติ เพราะการอินทิเกรต ก็คือการรวมขนาดของชิ้นส่วนเล็กๆ เข้าด้วยกันนั่นเอง สำหรับการอินทิเกรตใน Matlab สามารถทำได้ทั้งสองกรณีข้างต้น เพราะว่าในกรณีที่ 2 หากว่าจะใช้การอินทิเกรตเชิงตัวเลข ก็จะเหมือนกันกับวิธีแรกก็จะต้องคำนวณค่าฟังก์ชันออกมาเป็นจุดๆ ก่อน ซึ่งความละเอียดของผลที่ได้ก็ขึ้นอยู่กับความห่างของข้อมูลในแต่ละจุด

อย่างไรก็ตามสำหรับ Matlab แล้วหากเรามีข้อมูลแบบที่เป็นจุดซึ่งไม่ทราบค่าฟังก์ชันที่แท้จริง เราจะสามารถใช้ การอินทิเกรตเชิงตัวเลขด้วยวิธี Trapezoidal ซึ่งถือว่ามีความละเอียดไม่มากนัก แต่ว่าหากเราทราบฟังก์ชันที่จะอินทิเกรต เราจะสามารถใช้วิธีการอินทิเกรตเชิงตัวเลขที่ให้ความละเอียดมากกว่า เช่น Simpson's Rule แต่วิธีการใช้แบบหลังนี้อาจจะยุ่งยากกว่าบ้างเพราะต้องมีการเขียนฟังก์ชันไฟล์เพิ่มเติมขึ้นมา

การอินทิเกรตเชิงตัวเลขด้วยวิธี Trapezoidal นั้น Matlab จะใช้ ฟังก์ชัน trapz โดยการกำหนดค่าเวกเตอร์ หรือ เมตริกซ์ x และ y เป็นการกำหนดข้อมูลแต่ละจุด ซึ่งมีรูปแบบดังนี้

$\text{trapz}(x,y)$ จะเป็นการ อินทิเกรต $\int y(x)dx$ โดย x และ y เป็น column vector ถ้า x และ y เป็นเมตริกซ์ จะคำนวณแต่ละคอลัมน์ของเมตริกซ์นั้น ถ้า x เป็น column vector และ y เป็นเมตริกซ์ จะเทียบแต่ละคอลัมน์ของ y เทียบกับ x

การอินทิเกรตแบบ Quadrature คือวิธีการเชิงตัวเลขที่ใช้หาพื้นที่ใต้กราฟของฟังก์ชัน สำหรับ Matlab จะมีฟังก์ชันให้เลือกได้ 2 ฟังก์ชัน ซึ่งแต่ละฟังก์ชันจะใช้วิธีการคำนวณที่แตกต่างกัน ฟังก์ชันที่กล่าวถึงนั้นคือ ฟังก์ชัน quad และ quad8 อย่างไรก็ตามการใช้ฟังก์ชันทั้งสองนี้ผู้ใช้จะต้องเขียนฟังก์ชันไฟล์ขึ้นมา โดยฟังก์ชันไฟล์ นั้นจะต้องบรรจุฟังก์ชัน $y = f(x)$ ที่ต้องการอินทิเกรตไว้ แล้วใช้คำสั่ง quad หรือ quad8 คำนวณหาค่าอินทิเกรต โดยมีรูปแบบของคำสั่งทั้งสองเป็น

$\text{quad}(\text{'function'}, a,b)$ หรือ

$\text{quad}(\text{'function'}, a,b,\text{tol},\text{trace})$ หรือ

$\text{quad}(\text{'function'}, a,b,\text{tol},\text{trace},p1,p2\dots)$

โดย 'function' คือชื่อฟังก์ชันไฟล์ที่เขียนไว้ก่อนหน้านี้ a และ b เป็นค่าคงที่สำหรับกำหนดจุดเริ่มอินทิเกรตจาก a ถึง b ส่วนที่เหลือจากนี้คือ tol , trace , $p1, \dots$ จะมีหรือไม่ก็ได้ สำหรับ tol เป็นค่าที่กำหนด relative error ของการอินทิเกรต ถ้าไม่กำหนด Matlab จะตั้งค่าไว้ที่ 0.001 ส่วน trace คือฟังก์ชันที่จะใช้พล็อตจุด และ $p1, p2$ คือค่าพารามิเตอร์อื่นๆ ที่จะส่งไปให้กับ Matlab ซึ่งสามารถดูรายละเอียดได้จากคำสั่ง `help quad` สำหรับคำสั่งนี้ Matlab จะใช้วิธีการของ Simpson's ในการหาค่าอินทิเกรต

$\text{quad8}(\text{'function'}, a,b)$ หรือ

$\text{quad8}(\text{'function'}, a,b,\text{tol},\text{trace})$ หรือ

$\text{quad8}(\text{'function'}, a,b,\text{tol},\text{trace},p1,p2\dots)$

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จะเหมือนฟังก์ชัน quad เพียงแต่การคำนวณจะละเอียดมากกว่าโดยจะใช้วิธีการของ Newton-Cotes 8 panel ในการหาค่าอินทิเกรต (สามารถดูรายละเอียดเพิ่มเติมได้ในบทที่ 3 ข้างต้น) ซึ่งจะเหมาะกว่า quad ในด้านความละเอียดและหาค่าอินทิเกรตของฟังก์ชันที่มี singularity อยู่ในช่วงที่ต้องการอินทิเกรต

4.3.3 การทดสอบอัลกอริทึมทางคณิตศาสตร์

4.3.3.1 การประมาณค่าระหว่าง และการแทนกลุ่มข้อมูลด้วยเส้นที่เหมาะสม

ในที่นี้จะใช้วิธี Polynomial regression ในการพิจารณาถึงอันดับที่เหมาะสม และหาฟังก์ชันพหุนามอันดับ m (m^{th} order polynomial) ของเส้นที่เหมาะสมดังกล่าว โดยมีวิธีการเป็นดังนี้

สมการ m^{th} degree polynomial

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_mx^m + e \quad (4.7)$$

ซึ่งมีรูปแบบทั่วไปเป็น

$$y = a_0z_0 + a_1z_1 + a_2z_2 + \dots + a_mz_m + e \quad (4.8)$$

เมื่อ $z_0, z_1, \dots, z_m$ คือฟังก์ชันที่ใช้ในการประมาณ

ทำการจัดรูปของสมการที่(4.8) ใหม่เป็น

$$\begin{aligned} y(x) &= a_0z_0(x) + a_1z_1(x) + a_2z_2(x) + \dots + a_mz_m(x) + e \\ &= \sum_{j=0}^m a_jz_j(x) + e \end{aligned} \quad (4.9)$$

■ เกณฑ์เพื่อหาเส้นที่เหมาะสมที่สุด

วิธีการหนึ่งในการหาเส้นที่เหมาะสมที่สุดคือ ทำให้ผลรวมของค่าผิดพลาดมีค่าน้อยที่สุด (minimize the sum of the squares of the residuals, S_r) และสามารถพิจารณาเงื่อนไขดังกล่าวได้ดังนี้

$$\begin{aligned} S_r &= \sum_{i=1}^n e_i^2 \\ &= \sum_{i=1}^n \left[y_i - \sum_{j=0}^m a_jz_j(x_i) \right]^2 \end{aligned} \quad (4.10)$$

ให้ $z_{ji} = z_j(x_i)$ จะได้

$$S_r = \sum_{i=1}^n \left[y_i - \sum_{j=0}^m a_j z_{ji} \right] \quad (4.11)$$

หาค่า minimize

$$\frac{\partial S_r}{\partial a_j} = 0 \quad (j=0,1,2,\dots,m)$$

$$\sum_{i=1}^n \left\{ \left[y_i - \sum_{k=0}^m a_k z_{ki} \right] z_{ji} \right\} = 0 \quad (4.12)$$

และ

$$\frac{\partial S_r}{\partial a_j} = 0 \quad (j=0,1,2,\dots,m)$$

$$\sum_{i=1}^n \left\{ \left[y_i - \sum_{k=0}^m a_k z_{ki} \right] z_{ji} \right\} = 0 \quad (4.13)$$

ดังนั้นจะได้

$$\sum_{i=1}^n \sum_{k=0}^m a_k z_{ki} z_{ji} = \sum_{i=1}^n y_i z_{ji} \quad (j=0,\dots,m) \quad (4.14)$$

ซึ่งเป็น "Normal Equation" สำหรับ regression coefficients $a_0 \dots a_m$ โดยที่ normal equations คือ $(z^T z)A = z^T y$ และสามารถเขียน normal equations ในรูปเมตริกซ์ได้เป็น

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \quad A = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_m \end{bmatrix} \quad \text{และ} \quad z = \begin{bmatrix} z_{01} & \dots & z_{j1} & \dots & z_{m1} \\ z_{02} & & z_{j2} & & z_{m2} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ z_{0n} & & z_{jn} & & z_{mn} \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

- Standard error of the estimate ($S_{y/x}$)

$$S_{y/x} = \sqrt{\frac{S_r}{n-(m+1)}} \quad (4.16)$$

เมื่อ m คือ อันดับของฟังก์ชันพหุนาม

- Sum of squares of residuals about the mean $\bar{y}$ (S_t)

$$S_t = \sum (y_i - \bar{y})^2 \quad (4.17)$$

- Coefficient of determination (r^2)

$$r^2 = \frac{S_t - S_r}{S_t} \quad (4.18)$$

- Correlation coefficient (r)

$$r = \sqrt{\frac{S_t - S_r}{S_t}} \quad (4.19)$$

โดยมีเงื่อนไขในการพิจารณาคัดเลือกค่าสำหรับเส้นที่เหมาะสมที่สุดเป็น $S_r = 0$, $r^2 = 1$ และ $r = 1$ ซึ่งถ้าเป็นไปตามกรณีดังกล่าวจะแสดงว่าเส้นที่มีค่าต่อเนื่องที่ได้สามารถแทนข้อมูลได้ 100%

4.3.3.2 การอินทิเกรตเชิงตัวเลข

ในที่นี้อาศัยวิธีการของซิมป์สัน (Simpson's method) ในการอินทิเกรตเชิงตัวเลขเพื่อใช้ในการหาพื้นที่ภายใต้เส้นโค้งของฟังก์ชันที่ต้องการอินทิเกรต โดยวิธีของซิมป์สัน จะทำการประมาณเส้นโค้งที่ต้องการทราบค่าด้วยส่วนของพาราโบลา (parabola) เล็กๆต่อกัน ซึ่งจะทำให้การแบ่ง

ช่วงที่ต้องการอินทิเกรต $[a, b]$ จาก a ถึง b เป็นระยะเท่า ๆ กันด้วยจำนวนคู่ โดยมี n เป็นช่วงที่ทำการแบ่ง และมีรูปแบบของสมการเป็นดังนี้

$$\int_a^b f(x) dx = \frac{h}{3} \left\{ f_0 + 4(f_1 + f_3 + f_5 + \dots + f_{2n-1}) + 2(f_2 + f_4 + \dots + f_{2n-2}) + f_{2n} \right\} \quad (4.20)$$

$$\text{เมื่อ } h = \frac{(b-a)}{2n}$$

$$\text{และ } f_i = f_{(xi)}$$

ซึ่งสามารถเขียนเป็นรูปแบบทั่วไปได้ดังนี้

$$S_k = \frac{1}{3} \Delta x_k \left[f_a + 4 \sum_{i=1}^{n-1} f_{(a+i\Delta x_k)} + 2 \sum_{i=2}^{n-2} f_{(a+i\Delta x_k)} + f_b \right] \quad (4.21)$$

โดยที่ S_k คือ พื้นที่ใต้กราฟของฟังก์ชันที่ต้องการทราบค่า

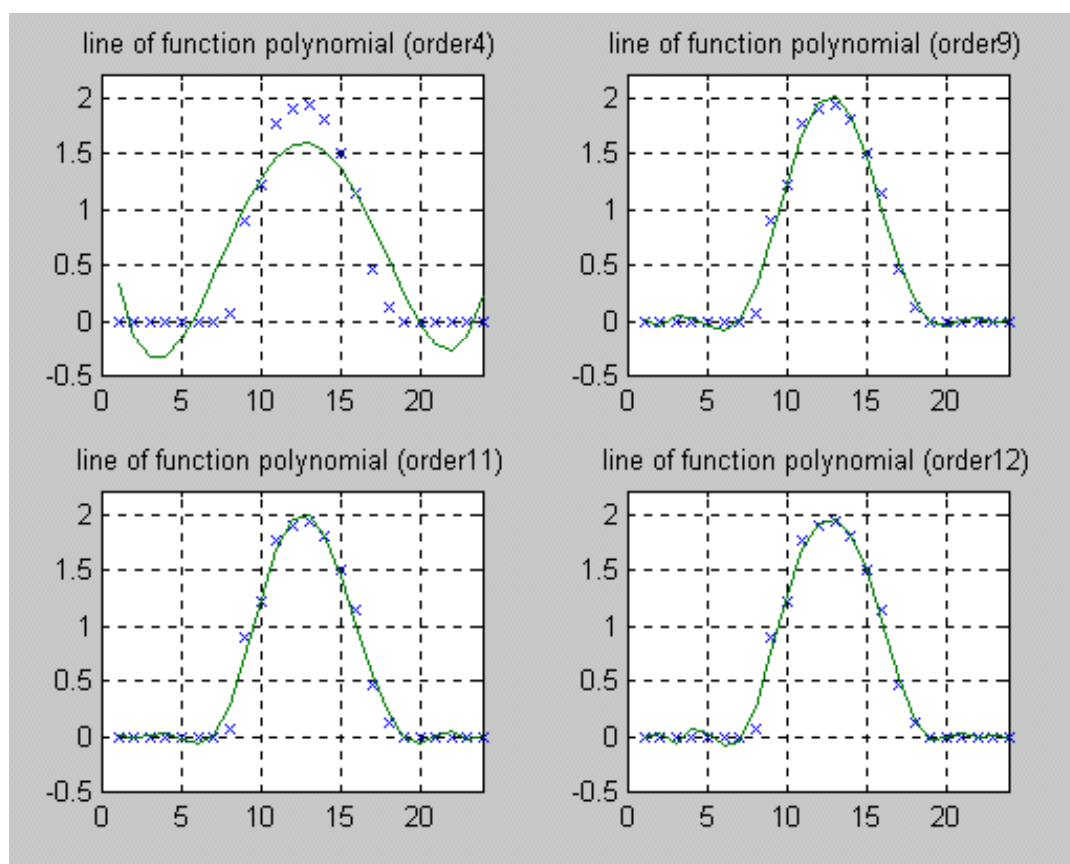
$$\text{และ } \Delta x_k = \frac{(b-a)}{2^k}$$

เมื่อได้อัลกอริทึมและระเบียบวิธีการคำนวณที่เหมาะสมแล้ว ขั้นตอนต่อไปก็นำอัลกอริทึมและวิธีการดังกล่าวข้างต้นมาทำการทดสอบเพื่อดูความถูกต้องแม่นยำของระเบียบวิธีการคิดข้างต้น โดยทำการทดสอบกับฟังก์ชันมาตรฐานต่างๆ ที่ทราบค่าผลเฉลยที่แน่นอนแล้ว รวมทั้งนำอัลกอริทึมดังกล่าวมาทดสอบกับระบบการใช้งานจริงด้วย

4.3.3.3 การทดสอบการประมาณค่าด้วยเส้นที่เหมาะสม

ใช้การประมาณด้วยฟังก์ชันพหุนามอันดับต่างๆ และทำการคำนวณหาผลลัพธ์ของการประมาณค่า ซึ่งได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 โดยมีสมการจริงเป็น $f(x) = x \cdot \sin(x)$ โดยใช้หลักที่ว่าเส้นกราฟที่ได้จากการประมาณค่าอาจไม่ผ่านจุดข้อมูลทุกจุด แต่จะต้องเป็นเส้นกราฟที่ทำให้เกิดความผิดพลาดจากกลุ่มของข้อมูลที่ทำการทดสอบน้อยที่สุด จึงจะถือได้ว่ากราฟเส้นนั้นมีความเหมาะสมสามารถใช้แทนกลุ่มของข้อมูลนั้นได้และสามารถนำไปใช้เป็นตัวแทนในการวิเคราะห์

ระบบในประเด็นอื่นๆต่อไปได้ โดยพิจารณาจากตัวอย่างเส้นกราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า อันดับของฟังก์ชันพหุนามค่าต่างๆ ที่ใช้ในการประมาณจากรูปที่ 4.16 ดังนี้



รูปที่ 4.16 การเปรียบเทียบฟังก์ชันพหุนามอันดับต่างๆ สำหรับการประมาณค่าของข้อมูลตัวอย่าง

ตารางที่ 4.1 ผลการคำนวณและเปรียบเทียบค่ากับฟังก์ชันตัวอย่างที่ทราบผลเฉลยที่แน่นอนแล้ว

อันดับของฟังก์ชันพหุนาม ที่ใช้ในการประมาณค่า	Standard error of the estimate ($s_{y/x}$)	Coefficient of determination (r^2)	Correlation coefficient (r)
อันดับที่ 1 (สมการเส้นตรง)	5.7549	0.4331	0.6581
อันดับที่ 2 (สมการพาราโบลา)	2.7158	0.5842	0.7643
อันดับที่ m^{th}	2.8284	0.9974	0.9987

จากตารางแสดงการเปรียบเทียบผลการคำนวณข้างต้นเมื่อทำการเพิ่มอันดับ(order)ของฟังก์ชันพหุนาม(polynomial function)ที่ใช้ในการประมาณค่าให้มากขึ้น จะส่งผลให้ค่าความคลาดเคลื่อนในการประมาณลดลง นั่นคือจะทำให้ได้ผลลัพธ์ที่มีค่าใกล้เคียงกับข้อมูลตามความเป็นจริงมากที่สุด แต่ทั้งนี้ก็ต้องพิจารณาถึงค่าผิดพลาดในส่วนอื่นอันได้แก่ ค่าผิดพลาดเพราะปัดเศษ

(Round-off Error) และค่าผิดพลาดเพราะตัดปลาย (Truncation Error) ประกอบด้วย

เมื่อได้อัลกอริทึมและระเบียบวิธีการคำนวณที่เหมาะสมแล้ว ขั้นตอนต่อไปก็นำอัลกอริทึมและวิธีการดังกล่าวข้างต้นมาทำการทดสอบเพื่อดูความถูกต้องแม่นยำของระเบียบวิธีการคิดข้างต้น โดยทำการทดสอบกับฟังก์ชันมาตรฐานต่าง ๆ ที่ทราบค่าผลเฉลยที่แน่นอนแล้ว รวมทั้งนำอัลกอริทึมดังกล่าวมาทดสอบกับระบบการใช้งานจริงด้วย

4.3.3.4 การทดสอบอัลกอริทึมกับระบบจริง

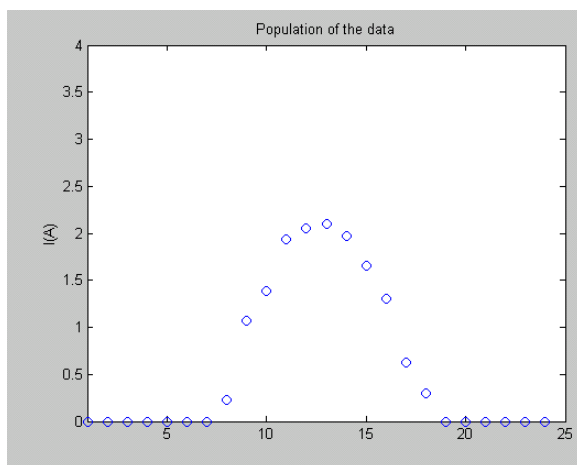
ทำการทดสอบใช้งานกับระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์เพื่อเปรียบเทียบวิธีการที่ได้นำเสนอกับวิธีการทำคุณพลังงานแบบปกติ หลังจากที่ได้ทำการทดสอบอัลกอริทึมที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์แล้ว โดยมีข้อมูลและรายละเอียดของระบบจ่ายพลังงานไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์ที่ทำการทดสอบเป็นดังนี้

ตำแหน่งการติดตั้งทดสอบ : Lat. 13.0° N, Long. 100° E

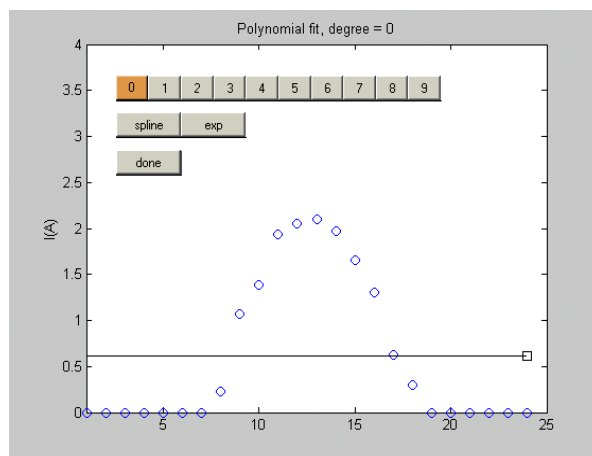
แผงเซลล์แสงอาทิตย์ : ชนิดซิลิกอนผลึกเดี่ยว รุ่นBPTS 1255 HPขนาดพิกัด 55 W_p

ภาระที่ใช้ในการทดสอบ : เป็นโหลดความต้านทานแบบปรับค่าได้

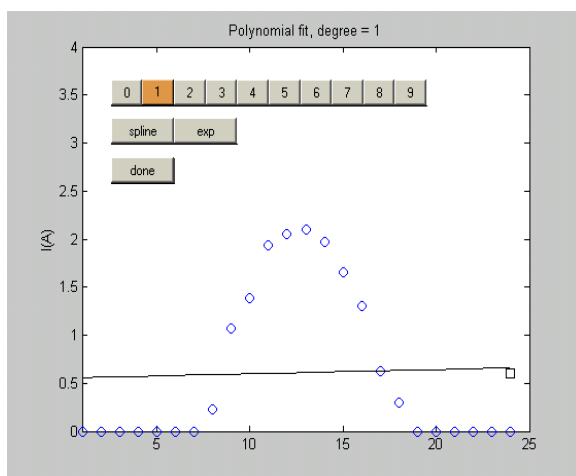
ทำการทดสอบเพื่อหารูปแบบของฟังก์ชันที่เหมาะสมสำหรับข้อมูลการใช้งานระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์รูปที่ 4.17 แสดงตัวอย่างการเปรียบเทียบระหว่างฟังก์ชันพหุนาม(polynomial function) ที่ใช้อันดับต่างๆกัน กับการประมาณค่าด้วย ฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล(exponential function) โดยผลการทดสอบและการวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าสามารถแสดงดังตารางที่ 4.2



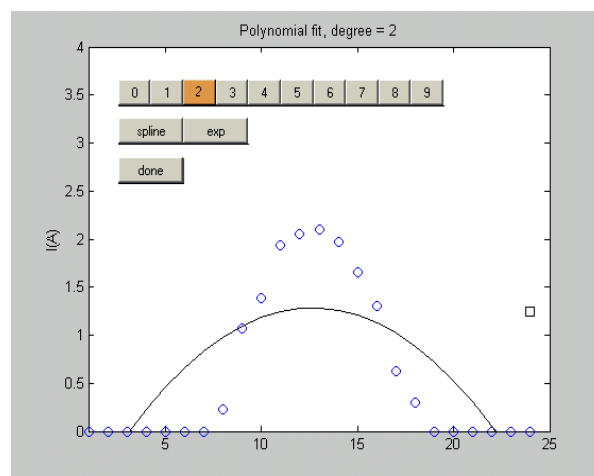
4.17 (ก)



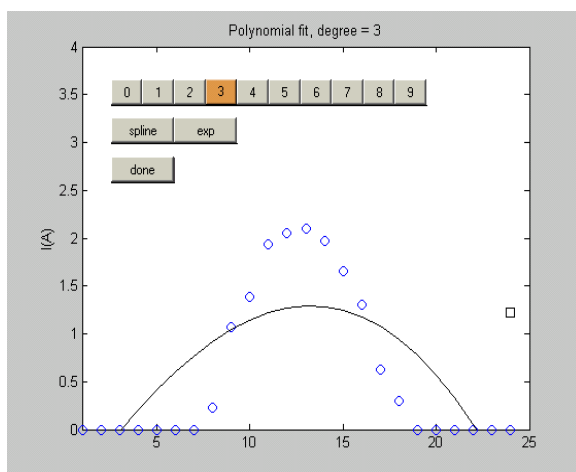
4.17 (ข)



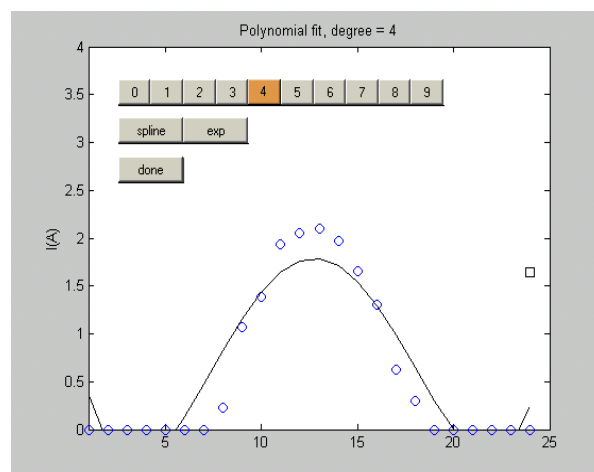
4.17 (f)



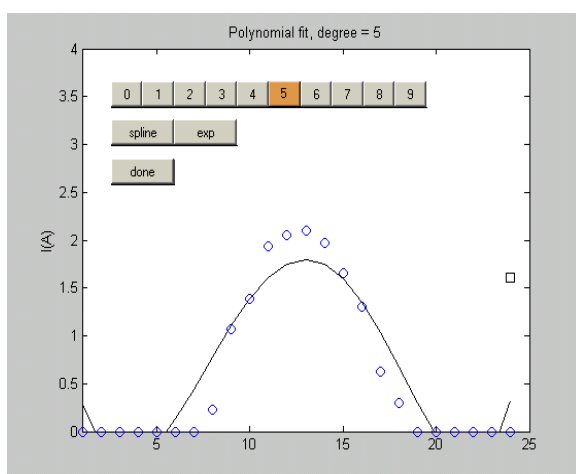
4.17 (g)



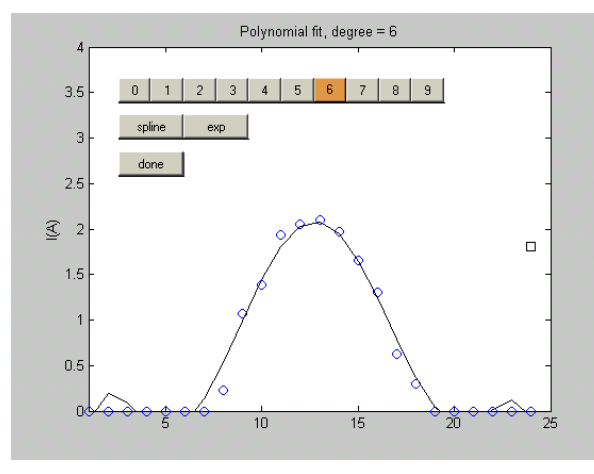
4.17 (h)



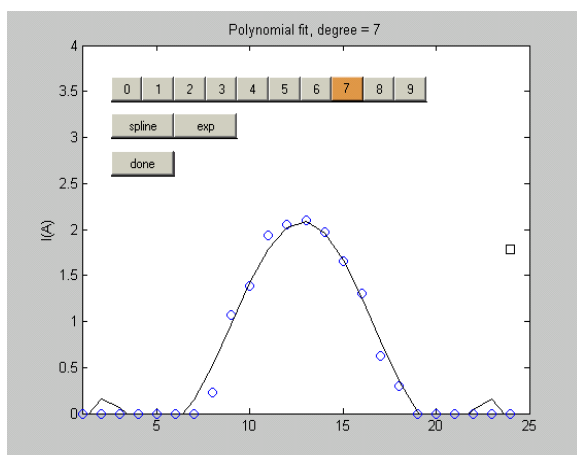
4.17 (i)



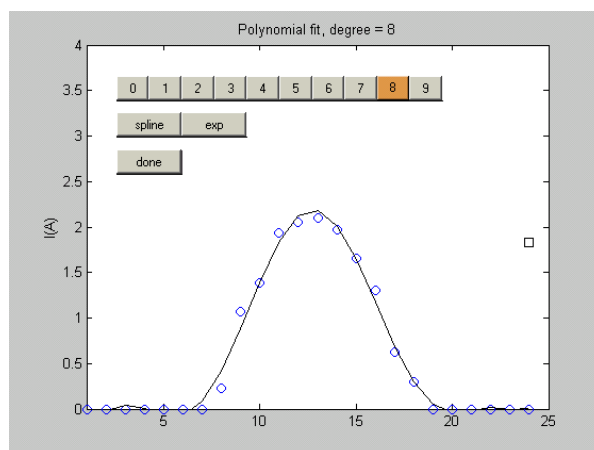
4.17 (j)



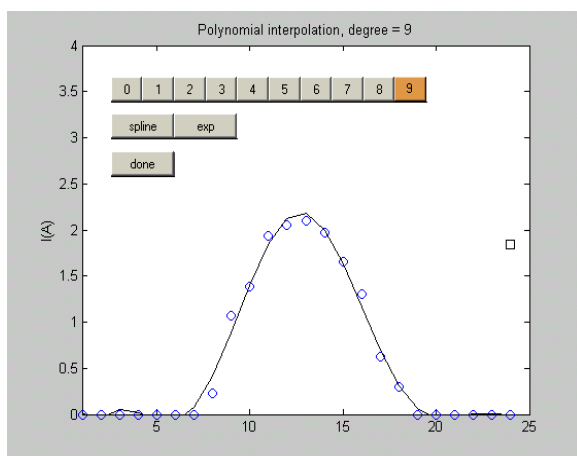
4.17 (k)



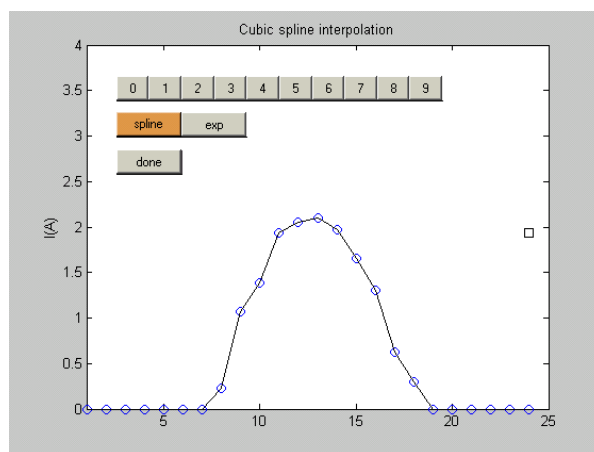
4.17 (ฉ)



4.17 (ญ)



4.17 (ฎ)



4.17 (ฏ)

รูปที่ 4.17 การเปรียบเทียบฟังก์ชันพหุนามอันดับต่างๆ สำหรับการประมาณค่าของระบบไฟฟ้า
แสงอาทิตย์

- | | | | |
|--------------|-------------|-------------|-------------|
| ก) ฐานข้อมูล | ข) อันดับ 0 | ค) อันดับ 1 | ง) อันดับ 2 |
| จ) อันดับ 3 | ฉ) อันดับ 4 | ช) อันดับ 5 | ซ) อันดับ 6 |
| ฉ) อันดับ 7 | ญ) อันดับ 8 | ฎ) อันดับ 9 | ฏ) spline |

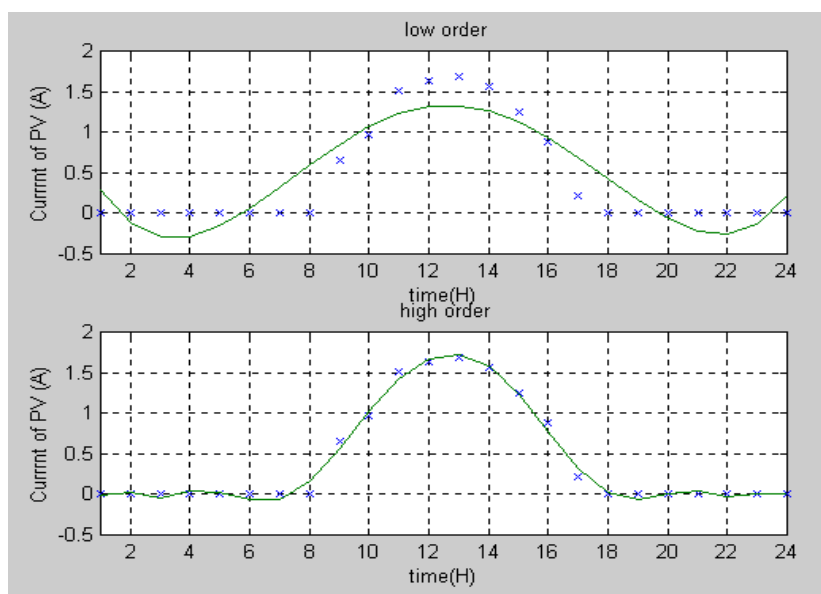
เมื่อพิจารณาจากผลการคำนวณการประมาณค่าเพื่อหาเส้นที่เหมาะสม โดยใช้ฟังก์ชันพหุนามอันดับต่างๆ จะให้ผลลัพธ์ของค่า Coefficient of determination (r^2) ที่แตกต่างกัน และถ้าเลือกใช้อันดับในการประมาณค่าที่เหมาะสมแล้วจะทำให้ได้ค่าผลรวมของค่าที่ผิดพลาดมีค่าต่ำ และได้เส้นกราฟที่เหมาะสมเพื่อการวิเคราะห์ข้อมูลต่อไป

ตารางที่ 4.2 ผลการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ r^2 ของฟังก์ชันที่ใช้ในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้า
แสงอาทิตย์

รูปแบบฟังก์ชันที่ใช้ ในการประมาณค่า	ลักษณะการประมาณ	ผลลัพธ์จากการคำนวณค่า coefficient of determination (r^2)
ฟังก์ชันพหุนาม อันดับที่ m (m^{th} - order polynomial)	อันดับที่ 1	0.0102
	อันดับที่ 2	0.8969
	อันดับที่ 3	0.9835
	อันดับที่ 4	0.9893
	อันดับที่ 5	0.9921
	อันดับที่ 6	0.9922
	อันดับที่ 7	0.9970
	อันดับที่ 8	0.9974
	อันดับที่ 9	0.9985
	อันดับที่ 10	0.9989
ฟังก์ชันเอ็กโพเนนเชียล (exponential)	$P_e(x) = ae^{bx}$	0.8971

สำหรับผลการคำนวณด้วยฟังก์ชันพหุนามจะให้ค่า Coefficient of determination(r^2) สูงสุดในอันดับที่10 โดยได้ค่า r^2 เป็น 0.9989 ในขณะที่การประมาณด้วยฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล (exponential function) จะได้ค่า Coefficient of determination(r^2) เป็น 0.8971 ซึ่งถือว่ายังไม่เหมาะสมกับการนำมาใช้วิเคราะห์ระบบดังกล่าวเนื่องจากมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงกว่าการประมาณด้วยฟังก์ชันพหุนาม

จากผลการทดสอบและการเปรียบเทียบผลที่ได้โดยใช้ฟังก์ชันพหุนาม (polynomial function) กับฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล (exponential function) ตามตารางที่ 4.2 ข้างต้นจะพบว่าฟังก์ชันที่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้ในการวิเคราะห์การจ่ายพลังงานของระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์คือฟังก์ชันพหุนามเนื่องจากมีค่าความคลาดเคลื่อนจากการประมาณค่าต่ำกว่าการประมาณด้วยฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล ส่วนการเปรียบเทียบความแตกต่างของอันดับ (order) ฟังก์ชันพหุนาม ที่ค่าอันดับต่ำ และค่าอันดับสูง เพื่อใช้ในการประมาณค่าของระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ในการทดสอบติดตั้งจริงสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 การเปรียบเทียบฟังก์ชันพหุนาม ที่ค่าอันดับต่ำ และค่าอันดับสูง ที่ใช้ในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์

การใช้ฟังก์ชันพหุนามอันดับที่เหมาะสมจากอัลกอริทึมที่ได้นำเสนอ จะทำให้ได้ค่า Coefficient of determination (r^2) เป็น 0.9989 และมีค่า Correlation coefficient (r) เป็น 0.9994 นั่นคือเส้นกราฟของฟังก์ชันดังกล่าวสามารถใช้แทนกลุ่มข้อมูลจากการทดสอบได้เป็น 99.9 %

4.4 กรณีศึกษา การจ่ายพลังงานของระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์เพื่อใช้กับระบบป้องกันการผุกร่อนของท่อโลหะ (ส่วนที่ 1 : หลักการ และเงื่อนไขการออกแบบใช้งาน)

วิธีป้องกันการผุกร่อนของท่อโลหะที่ได้ผลดีที่สุดคือ “active cathodic protection” ซึ่งจะเรียกว่าการป้องกันการผุกร่อนชนิดกัมมันต์ การผุกร่อนของโลหะสาเหตุมาจากแรงดันไฟฟ้าทางเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างสารละลายนำไฟฟ้า (electrolyte) ซึ่งในที่นี้ก็คือพื้นดินนั่นเอง [25]กับตัวท่อเอง โดยตัวท่อมีแรงดันไฟฟ้ามีศักย์เป็นบวกเทียบกับดิน ผลที่เกิดขึ้นขณะมีกระแสไฟฟ้าไหลจากท่อลงสู่พื้นดินคือไอออนของโลหะจะหลุดออกมาด้วยเกิดการสีกกร่อนนานไปก็จะกลายเป็นรูโหว่ทะลุผนังท่อเข้าไป

หลักการของการป้องกันการผุกร่อนชนิดกัมมันต์ก็คือด้านหรือกลับทิศทางของกระแสไฟฟ้าที่ไหลระหว่างท่อโลหะกับพื้นดินโดยการจ่ายไฟที่แรงดันมีศักย์เป็นลบเข้าที่ท่อ เพื่อแก้แรงดันบวกที่มีอยู่ระหว่างแนวท่อกับพื้นดิน แรงดันลบที่ว่านั้นจะให้ได้โดยต่อขั้วลบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือเครื่องจ่ายไฟตรงเข้ากับตัวท่อ และต่อขั้วบวกของมันลงขั้วดิน ขนาดแรงดันลบที่น้อยที่สุดที่จะ

ต้องจ่ายให้กับท่อเทียบกับดินและเพียงพอที่จะป้องกันการผุกร่อนได้ก็คือ 0.85 โวลต์ เรียกแรงดันค่านี้ว่า “แรงดันเทรชโฮลด์ที่ปลอดภัย” (safety threshold voltage) ในทางปฏิบัติมักให้แรงดันนี้สูงกว่าเกณฑ์เพื่อให้เกิดความมั่นใจในความปลอดภัยในการทำงานของท่อ

4.4.1 การวิเคราะห์ระบบป้องกันการผุกร่อนของท่อโลหะ

ก่อนที่จะกำหนดขนาดกระแสและแรงดันของตัวจ่ายไฟ ณ จุดที่จะทำการป้องกันการผุกร่อน เราจะต้องศึกษาเกี่ยวกับพารามิเตอร์ที่สำคัญบางตัวและเกี่ยวข้องกับระบบนี้ พารามิเตอร์ที่สำคัญที่สุด 2 ตัว ซึ่งเป็นตัวแสดงขนาดของกระแสที่ต้องการคือ ความต้านทานรั่ว(leakage resistance) ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของท่อเทียบกับดิน(Ω/m^2) และความต้านทานตามยาว(longitudinal resistance) ต่อหนึ่งหน่วยความยาวท่อ(Ω/m) ปกติท่อโลหะจะได้รับการพอกด้วยแถบรีบอนที่เป็นฉนวน ซึ่งก็ช่วยลดการผุกร่อนลงไปได้มาก อย่างไรก็ตามก็ยังมีหลุมและโพรงเล็กในตัวพอกหรือในรอยต่อ อันเป็นสาเหตุทำให้เกิดความต้านทานรั่วยังผลขึ้น สามารถวัดค่าได้เป็น Ω/m^2 พอรอบค่าความต้านทานนี้แล้วก็จะสามารถคำนวณกระแสต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของท่อที่ไหลจากดินเข้าสู่ท่อเพื่อให้แน่ใจว่ามีแรงดันปลอดภัยต่ำสุดที่ทุกๆ จุดของท่อที่ทำการต้านการผุกร่อน

โดยทั่วไปค่าความต้านทานรั่วสำหรับท่อที่พอกด้วยฉนวนแล้วอยู่ระหว่าง 1 - 10 $\text{k}\Omega/\text{m}^2$ เพื่อให้ได้แรงดันลบต่ำสุดประมาณ 1 โวลต์ [26] กระแสต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่จะอยู่ในช่วง 0.1 - 1.0 mA/m^2

ในรูป 4.19 (ก) แสดงแผนภาพของการป้องกันการผุกร่อนที่กล่าวมาแล้วและในรูป 4.19 (ข) ได้พล็อตการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นกระแสตามความยาวแนวท่อ โดยเริ่มจากจุดที่ต่อตัวจ่ายกำลังไฟให้ กระแสจะค่อยลดลงตามระยะทางที่เพิ่มขึ้น เพราะเกิดแรงดันลด (ตก) ในท่อเนื่องจากกระแสภายในไหลผ่านเข้าไปในความต้านอนุกรม

การเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นกระแสกับระยะทาง x ระหว่างจุด ($x=0$) ซึ่งมีตัวจ่ายกำลังไฟต่ออยู่กับปลายจุด ($x=L$) ของแนวท่อซึ่งเป็นส่วนที่อยู่ในข่ายการป้องกันจากตัวจ่ายกำลังไฟชุดเดียวกันให้เป็น

$$j(x) = j_L \cosh \alpha (L - x) \quad (4.22)$$

โดย j_L เป็นความหนาแน่นกระแสต่ำสุด (ที่จุด $x=L$) ที่จำเป็นในการทำให้เกิดแรงดันป้องกันต่ำสุด

และ α เป็นค่าคงตัวการลดทอน (attenuation constant) หาได้จาก

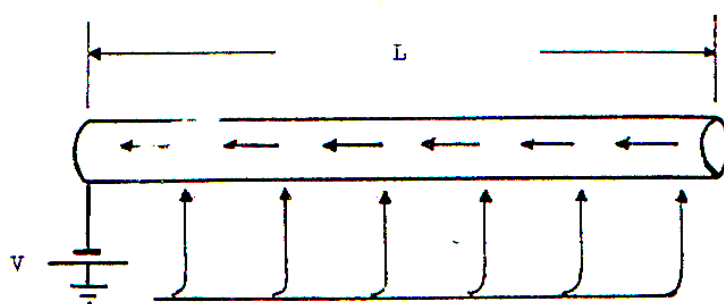
$$\alpha = R_s / R_L \quad (m^{-1}), \quad (4.23)$$

เมื่อ R_s เป็นความต้านทานอนุกรมของท่อต่อหนึ่งหน่วยความยาว (Ω/m)
 R_L เป็นความต้านทานรั่วต่อหนึ่งหน่วยความยาวและหนึ่งหน่วยพื้นที่ ($\Omega.m$)

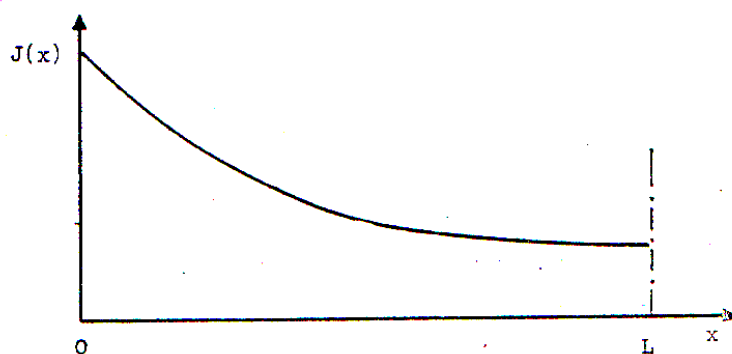
รวมกระแสที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายให้หาได้จากการอินทิเกรตสมการ 4.22 ดังนี้

$$I = \frac{\pi D}{\alpha} J_L \sinh(\alpha L) \quad (4.24)$$

โดย D เป็นเส้นผ่าศูนย์กลางกลางมีหน่วยเป็นเมตร



(ก)

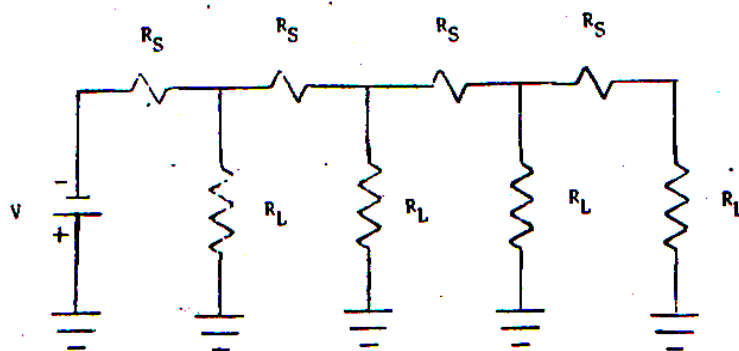


(ข)

รูปที่ 4.19 พารามิเตอร์ และองค์ประกอบของระบบป้องกันการผุกร่อนของท่อโลหะ ชนิดกัมมันต์

(ก) พารามิเตอร์ประกอบของท่อที่ต้องการป้องกันการผุกร่อน

(ข) การพล็อตความหนาแน่นกระแสตามความยาวท่อที่เป็นฟังก์ชันของระยะทางจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



รูปที่ 4.20 วงจรสมมูลของค่าความต้านทานรั่วของท่อ และความต้านทานอนุกรม

โดยปกติแล้วแนวท่อได้รับการคุ้มกันจากการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายไฟให้ท่อโดยทิ้งช่วงห่างกันแต่ละจุดเป็นระยะทางหลายสิบกิโลเมตร ตัวจ่ายกำลังไฟต้องมีศักย์สูงมากตามไปด้วย แรงดันของตัวจ่ายกำลังไฟใช้เป็นประโยชน์เท่าที่จำเป็นบนหุ้มปลายทางที่ลงดิน เพราะแรงดันระหว่างท่อกับตัวพื้นดินมักมีขนาดประมาณ 1 โวลต์ ในจุดที่จะคุ้มกันเนื่องจากแรงดันลดไม่มากนักตลอดท่อ ค่าตามปกติของ R_S คือ $1 - 10 \times 10^{-6} \Omega/m$ ต่อท่อเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 1 ถึง 3 เมตร แรงดันลดระหว่างจุด 0 และ L ของท่อเนื่องจากกระแสไหลผ่านตัวมันให้เป็น

$$V_L = \frac{(R_S / \pi) D J_L}{2} (1 - \cosh \alpha L) \quad (4.25)$$

แรงดันทั้งหมดที่ตัวจ่ายกำลังไฟจะต้องจ่ายให้ท่อนอกเหนือจาก V_L แล้วจะต้องจ่ายชดเชยแรงดันลด (ปกติมากกว่า V_L) เนื่องจากกระแสไหลเข้าไปยังปลายทางที่ลงดิน ดังในรูป 4.21 ดังนั้นแรงดันรวมของตัวจ่ายกำลังไฟคือ

$$V_T = V_L + I R_E \quad (4.26)$$

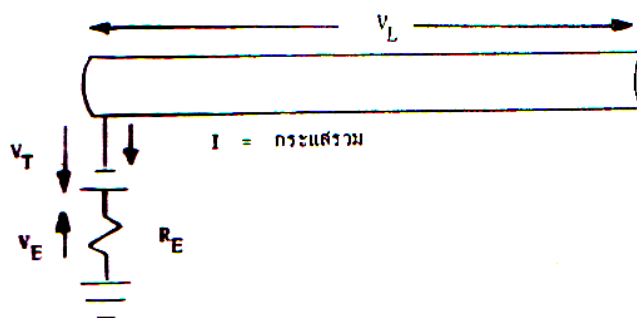
โดย R_E เป็นความต้านทานปลายทางที่ลงดินเทียบกับดิน,

I เป็นกระแสได้จากสมการ 4.24

และ V_L เป็นแรงดันสูงสุดระหว่างท่อกับดิน ได้จากสมการ 4.25

แรงดันสูงสุดที่ยอมรับได้ระหว่างปลายทางลงดินและท่อ เมื่อพิจารณาจากความต้องการในเรื่องความปลอดภัยจะให้ เป็น 50 โวลต์ ด้วยแรงดันสูงขนาดนี้ประกอบกับการพิจารณาราคาของตัวหุ้มที่ปลายทางลงดินจะเป็นตัวกำหนดขีดจำกัดบนของระยะที่อนุญาตได้ระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสองตัวถัดกัน ในทางปฏิบัติการเลือกจุดป้องกันตลอดแนวท่อได้รับอิทธิพลอย่างมากจากข้อ

ไฟสายส่งเพราะต่อไฟมาใช้ได้ง่าย ดังนั้นมักเลือกระยะระหว่างจุดป้องกันให้ห่างกันมากๆ และใช้กำลังการจ่ายไฟค่อนข้างสูง



รูปที่ 4.21 การสูญเสียแรงดันที่ปลายทางของจุดลงดิน

4.4.2 การออกแบบระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์สำหรับป้องกันการผุกร่อนของท่อโลหะ

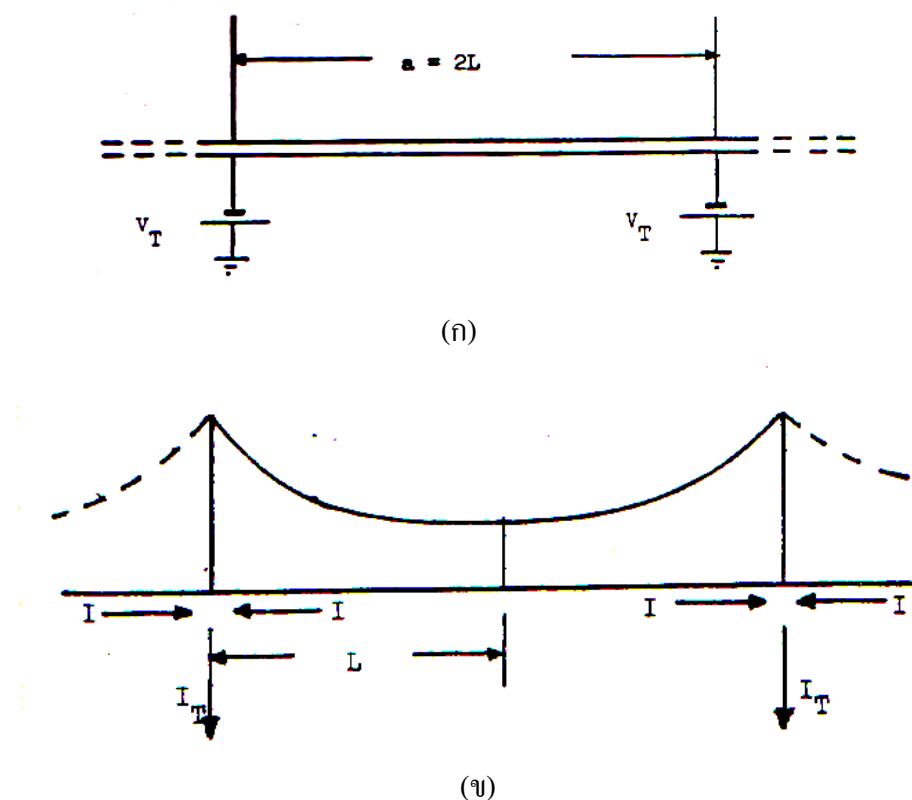
การป้องกันการผุกร่อนโดยใช้ระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำให้มีความเป็นอิสระ จากข้อจำกัดบางประการที่ประสบในการใช้ไฟจากระบบไฟฟ้าปกติของการไฟฟ้าที่นิยมใช้กัน คือ ต้องให้ความใกล้เคียงกับจ่ายไฟจากสายส่ง ในกรณีนี้ความเป็นอิสระจากระบบสายส่งไฟฟ้า และจากความต้องการที่จะลดกำลังไฟติดตั้งเนื่องจากราคาของเซลล์แสงอาทิตย์มีราคาค่อนข้างสูง ทำให้ต้องพิจารณาหลายแง่มุม การพิจารณาสิ่งที่กล่าวมานั้นมีสิ่งหนึ่งที่เป็นตัวกำหนด กล่าวคือสำหรับราคาการทำปลายทางลงดินรวมทั้งความต้านทานของมันเองด้วย ความต้องการไฟจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะแปรค่าตาม I^2 และตัวกระแสเองก็ค่อนข้างจะเป็นปฏิภาคกับความยาวที่อยู่ในข่ายป้องกัน ดังนั้นกำลังไฟจะต้องเพิ่มขึ้นกับระยะทางระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่อยู่ข้างเคียงกัน การคำนวณประกอบการออกแบบระบบป้องกันนี้ถ้าจะให้ลดต้นทุนของระบบควรปฏิบัติดังต่อไปนี้

รูปที่ 4.22 เป็นระยะทางระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้เป็นพารามิเตอร์ที่แปรค่าได้ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละตัวทำการป้องกันในส่วนของ $L = a/2$ ทั้งสองด้านที่มันครอบคลุมอยู่ และต้องให้กระแส I_T เป็นสองเท่าของกระแส I ที่ให้ไว้ในสมการ 4.24

เมื่อได้กำหนดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและชนิดของท่อแล้ว เราก็ควรตรวจค่า R_S และ R_L แล้วคำนวณ I และ V_L จากสมการ 4.24 และ 4.25 โดยเป็นฟังก์ชันของระยะทาง $a = 2L$ ระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 2 ตัวถัดกันกำลังไฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละตัวหาได้จาก

$$P_T = I_T \times V_T = 2I \times V_T \quad (4.27)$$

โดย V_T ได้จากสมการ 4.26 และขึ้นกับค่าของ R_E



รูปที่ 4.22 พารามิเตอร์ประกอบตามระยะทางของท่อที่ป้องกัน

- ก) ส่วนหนึ่งของแนวท่อที่อยู่ในข่ายการป้องกันการผุกร่อน
 ข) แผนภาพของกระแสไฟตลอดแนวท่อส่วนที่กำลังพิจารณา

ถ้าหมุดปลายทางลงดิน (electrode) เป็นแท่งโลหะทรงกระบอกปักลงไปในดิน ค่าความต้านทานจะขึ้นกับความลึกของดินส่วนที่หมุดปักลงไปด้วยความสัมพันธ์

$$R_E \cong \frac{3\rho}{2\pi t} \quad (4.28)$$

โดย ρ เป็นสภาพต้านทานของดินจากตาราง 4.3 และ t เป็นความลึกของหมุดขั้วไฟฟ้าที่ปักในดิน

ซึ่งสามารถคำนวณขนาดกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งเป็นฟังก์ชันของระยะทาง a ระหว่างตัวกำเนิดไฟฟ้าสองตัวที่อยู่ตรงกันข้ามกันสำหรับความต้านทานปลายทางลงดินค่าต่างๆ กันได้ รูป 4.23 เป็นการแสดงความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าที่ต้องการจากตัวกำเนิดไฟฟ้าที่เป็นฟังก์ชันของระยะทาง a สำหรับค่า R_E ต่างๆ กันสามค่า

ตารางที่ 4.3 ค่าสภาพต้านทานของดินชนิดต่าง ๆ กัน

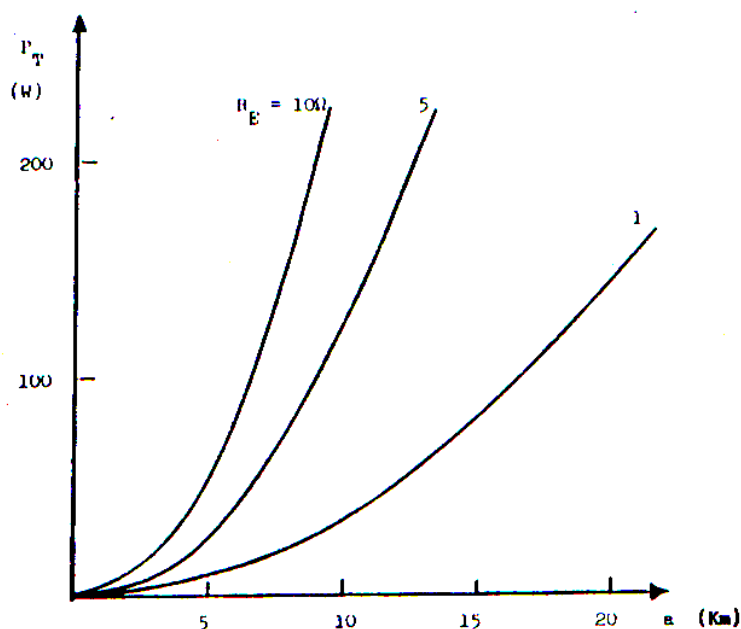
ชนิดของดิน	ค่าสภาพต้านทาน ρ (ohm - m)
ดินเหนียว	30 - 150
ดินร่วน	200 - 300
ทรายเปียก	200 - 300
ทรายแห้ง	2000 - 5000
หินปูนเปียก	30 - 100
หินปูนแห้ง	2000 - 5000
หินแข็ง	1000 - 5000

ขั้นต่อไปก็ต้องหาโหลดของระบบ (โหลดเป็นค่าคงตัว ถึงแม้การจ่ายกำลังไฟจะเป็นให้เป็นระยะ ๆ) แล้วจึงทำการทำดุลพลังงานของระบบเพื่อหาขนาดของสนามเซลล์สุริยะและแบตเตอรี่ที่ให้กำลังไฟและพลังงานตามที่ต้องการด้วยราคาต้นทุนที่ต่ำที่สุด

สิ่งที่ควรทราบไว้คือการป้องกันนี้จะขาดตอนได้ไม่เกิน 2 วันในหนึ่งปีเท่านั้น

กลับมาพิจารณาในเรื่องระบบเซลล์สุริยะที่จัดว่าเหมาะสมโดยการวิเคราะห์ราคาค่าใช้จ่าย

สำหรับค่า R_E แต่ละค่าที่ใช้ในการคำนวณข้างต้น เราสามารถหาราคาค่าใช้จ่าย C_E ของส่วนทางปลายลงดินได้ ซึ่งเป็นฟังก์ชันที่เพิ่มของ $1/R_E$



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าตัวกำเนิดไฟฟ้าที่เป็นฟังก์ชันของระยะทาง สำหรับท่อที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 เมตร ที่ค่า R_E ต่างๆ กัน

เราสามารถหาราคาของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และแบตเตอรี่ที่แต่ละระยะทาง a ได้ เมื่อทำการวิเคราะห์การทำดุลพลังงานแล้ว ราคารวม C_T สำหรับแต่ละค่าของระยะทาง a หาได้โดยการบวกราคาของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และแบตเตอรี่ เข้ากับราคาของส่วนปลายทางลงดิน C_E, C_T ซึ่งเป็นราคาเฉพาะการป้องกันที่จุดเดียวเท่านั้น และเป็นฟังก์ชันลดลงกับระยะทาง a

อย่างไรก็ตามเพื่อให้ได้ระบบที่เหมาะสมเราควรคำนึงถึงราคาต่อหนึ่งหน่วยความยาวของแนวท่อประกอบด้วย นั่นคือ $C_u = C_T / a$

ค่า C_T จะมีค่าสูงมากที่ระยะทาง a ต่ำๆ เพราะเป็นผลจากราคาของส่วนปลายทางลงดิน C_E ที่สูง ซึ่งไม่เกี่ยวกับ a ดังนั้น C_u จะเริ่มเพิ่มสูงขึ้นที่ค่า a ต่ำๆ และจะลดลงจนต่ำสุดที่ค่า a ค่าหนึ่ง (อิทธิพลของ C_E ลดน้อยลง) เมื่อ a เพิ่มมากขึ้นไปอีก C_u จะกลับเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากยิ่งระยะทาง a มากขึ้นก็ต้องใช้ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดโตขึ้นราคาจึงเพิ่มขึ้นมาก และสามารถจุดราคาต่ำสุดสำหรับค่า R_E แต่ละค่าได้ สิ่งที่เหมาะสมโดยสรุปแล้วสามารถทำได้โดยการเลือกค่า R_E และ a ที่ให้กราฟราคา C_u ต่ำที่สุดนั่นเอง

4.4.3 รูปแบบการใช้งานของระบบป้องกันการผุกร่อนโดยวิธี Cathodic Protection

การป้องกันการผุกร่อนโดยวิธี Cathodic Protection หรือ CP เกิดขึ้นก่อนที่ความรู้ด้านเคมีไฟฟ้าจะได้รับการพัฒนา Sir Humphrey Davy ทำ CP กับเรือของกองทัพเรืออังกฤษ ป้องกันแผ่นทองที่หุ้มเรือเดินทะเลเขาพบว่าสามารถป้องกันการผุกร่อนของทองแดงในน้ำทะเลได้โดยการติดเหล็กหรือดีบุกจำนวนเล็กน้อย Cathodic Protection ทำให้โลหะที่ต้องการป้องกันการผุกร่อนเปลี่ยนเป็นแคโทด แทนที่จะเป็นแอโนด ซึ่งจะเกิดการผุกร่อนได้สามารถทำได้ 2 วิธี

1) Sacrificial Anode

ทำได้โดยใช้โลหะอื่นที่มีค่าความสามารถในการดึงคู่อิเล็กตรอน (Electromotive force) หรือ emf ต่ำกว่า มาต่อไว้กับโลหะที่ต้องการป้องกัน และทำให้ครบวงจร โลหะที่ทำการป้องกันจะเป็นแคโทด และโลหะที่นำมาต่อไว้จะเป็นแอโนด

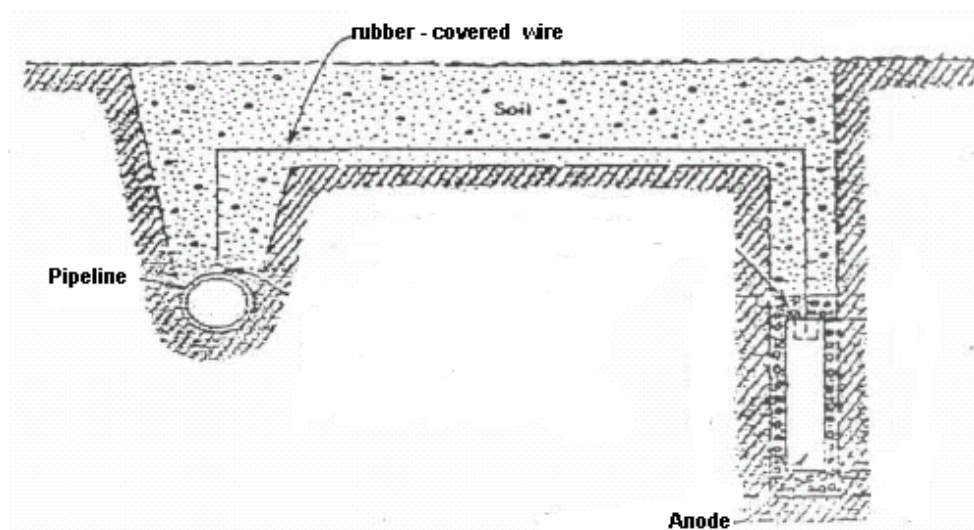
2) Impressed Current

โดยใช้กระแสไฟฟ้าจากภายนอกบังคับให้โลหะที่ต้องการป้องกันเป็นแคโทด ปริมาณกระแสไฟฟ้าต้องสูงมากพอที่จะชนะความต่างศักย์ของโลหะนั้นๆ เพื่อจะให้ระบบป้องกันการผุกร่อนนั้น มีอายุการใช้งานยาวนาน

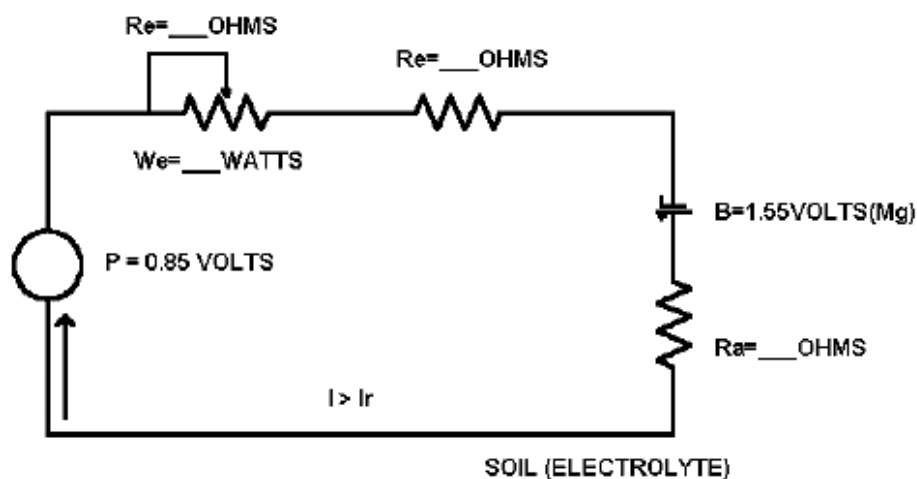
4.4.3.1 การป้องกันการผุกร่อนแบบ Sacrificial Anode

การป้องกันการผุกร่อนด้วยวิธีนี้ใช้ได้ดีในที่ที่ไม่มีแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า และในที่ที่มีความต้านทานต่ำ แอโนดที่ใช้เป็นโลหะที่มีตระกูลต่ำกว่าหรือว่องไวในการทำปฏิกิริยามากกว่า

สังกะสี อะลูมิเนียม และแมกนีเซียม เป็นต้น โดยได้ทำการแสดงองค์ประกอบของระบบ และวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของการป้องกันการผุกร่อนแบบ Sacrificial Anode ไว้ดังรูปที่ 4.24 และ 4.25 ตามลำดับ เนื่องจากโครงสร้าง หรือวัสดุที่จะป้องกัน มักมีการทาสีหรือปกคลุมผิวด้วยวิธีใดวิธีหนึ่งมาแล้ว แอโนดจึงทำหน้าที่ปกคลุมรอยแตกหรือรอยชำรุดของสีหรือวัสดุคลุมผิว เหมาะที่เข้ากับโครงสร้างที่ไม่สามารถซ่อมแซมได้ และต้องการอายุใช้งานนาน เช่น 10 ปี หรือ 20 ปี ส่วนใหญ่เป็นโครงสร้างใต้ดิน หรือใต้น้ำ ดินควรมีความต้านทานไฟฟ้าไม่เกิน 500 โอห์ม-เซนติเมตร



รูปที่ 4.24 การป้องกันการผุกร่อนแบบ Sacrificial Anode



รูปที่ 4.25 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของการป้องกันการผุกร่อนแบบ Sacrificial Anode

โดยสามารถคำนวณค่ากระแสของระบบในวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของการป้องกันการผุกร่อนแบบ Sacrificial Anode ได้ดังนี้

$$I = \frac{1.55 - .085}{Ra + Re + Rw} \quad (4.29)$$

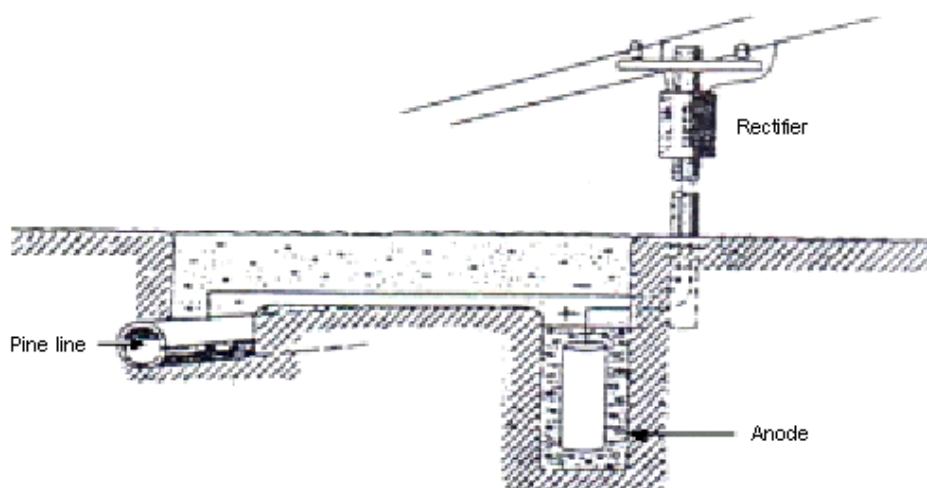
โดยมีพารามิเตอร์ต่างๆ เป็นดังนี้

Ra	=	Anode Resistance (Ohms)
Rw	=	Resistance of Winding (Ohms)
Re	=	Variable Resistance (Ohms)
We	=	Watt of Varrent Resistance (Watts)
I	=	Anode Current Output (Amp)
Ir	=	Current Requirment (Amp)

4.4.3.2 การป้องกันการผุกร่อนแบบ Impressed Current

จะใช้กระแสไฟฟ้าจากภายนอกเพื่อให้โครงสร้างที่ป้องกันเป็นแคโทด โดยต้องมีแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง หรือ Rectifier แปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง แอโนดที่ใช้ต้องฝังลงดินหรืออยู่ในน้ำให้กระแสครบวงจร โครงสร้างหรือชิ้นงานต่อกับขั้วลบ แอโนดต่อกับขั้วบวก

โดยการพิจารณาชนิดของแอโนดที่ใช้ขึ้นกับปริมาณกระแสที่ต้องใช้มากน้อยเท่าใด เช่น เศษเหล็ก มีราคาถูก กัดกร่อนเร็วต้องใช้ปริมาณมาก กราไฟต์ใช้ในลักษณะแท่งใช้กระแส 0.1 แอมป์/ตร.ม. ถ้ามามากกว่านี้จะบวม เหล็กผสมซิลิกอน 15% ผสม โมลิบดีนัมหรือโครเมียม 3% เพราะใช้กระแส 0.4 - 0.5 แอมป์/ตร.ม. ไททาเนียมชุบทองคำขาว ใช้กระแส 5-10 แอมป์/ตร.ม.



รูปที่ 4.26 การป้องกันการผุกร่อนแบบ Impressed Current

โดยสามารถคำนวณค่าแรงดันที่ระบบต้องการใช้งานสำหรับการป้องกันการผุกร่อนแบบ Impressed Current ได้ดังนี้

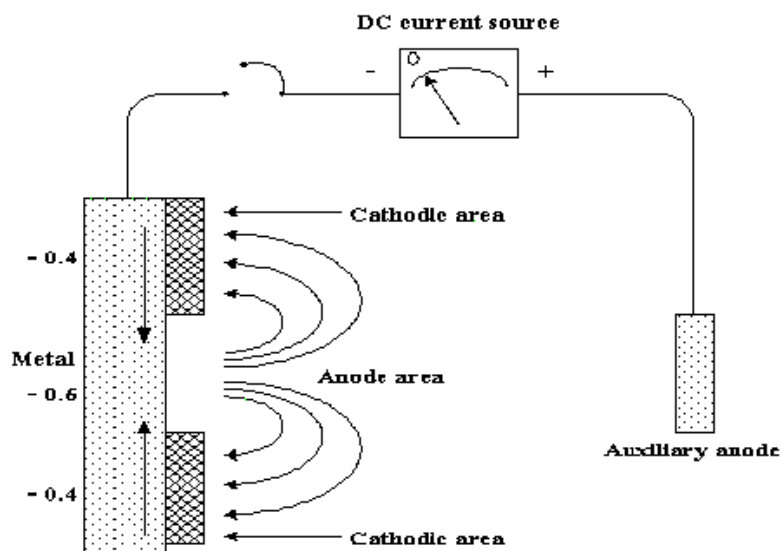
$$E = I_o * (R_a + R_w) + E_w \quad (4.30)$$

โดยมีพารามิเตอร์ต่างๆ เป็นดังนี้

E	=	O/P Voltage Required (Volts)
I_o	=	Max. Operating Current (Amp)
R_a	=	Earthing Resistance of Groundbed (Ohms)
R_w	=	Resistance of Wiring (Max = 0.2 Ohms)
E_w	=	Anode/Pipe Back Voltage (2.0 Volts)
I_p	=	Protective Current (Amp)

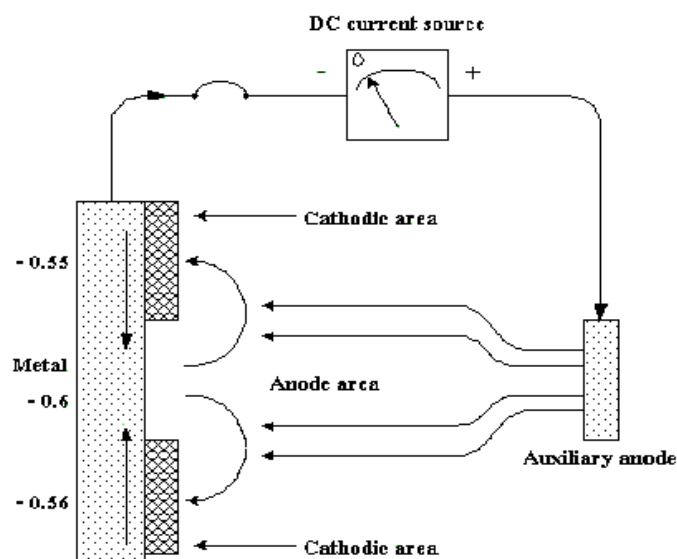
โดยมีขั้นตอนการทำงานเป็นดังนี้

ระยะที่ 1 : รูปที่ 4.27 ท่อโลหะถูกปกคลุมด้วยสารละลาย และยังไม่ได้มีการป้องกันการผุกร่อนทำให้โลหะตรงจุดที่เกิดความบกพร่องของฟิล์มออกไซด์เกิดการกัดกร่อนขึ้นเรียกว่าแอโนดส่วนผิวของโลหะในบริเวณข้างเคียงซึ่งไม่ได้เกิดความบกพร่องของฟิล์มออกไซด์จะไม่เกิดการกัดกร่อนเรียกว่าแคโทด ซึ่งตรงจุดที่มีการกัดกร่อนอะตอมของโลหะจะแตกร้าออกเป็น ไอออนของเหล็กและอิเล็กตรอนอิสระตามปฏิกิริยาของ Anode Reaction[27]



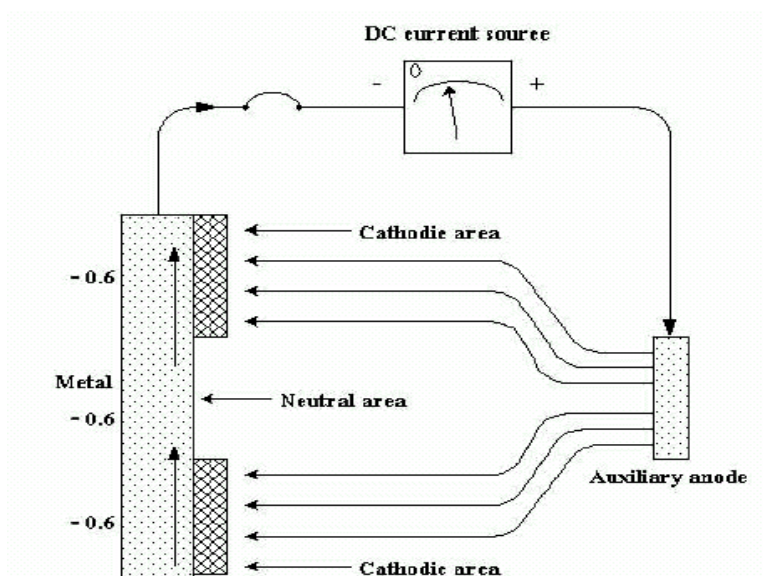
รูปที่ 4.27 สภาวะของท่อโลหะที่ยังไม่ได้รับการป้องกัน

ระยะที่ 2 : รูปที่ 4.28 ในตอนเริ่มต้นของการป้องกันการผุกร่อนตัวแอโนดจะเริ่มจ่ายกระแสเพียงเล็กน้อยเข้าไปช่วยขดเซซ และลดปฏิกิริยาของการผุกร่อนบางส่วน แต่ทั้งนี้โลหะยังคงมีการผุกร่อนอยู่เหมือนเดิมแต่ลดความเสียหายจากปฏิกิริยาบางอย่างซ้ำๆ



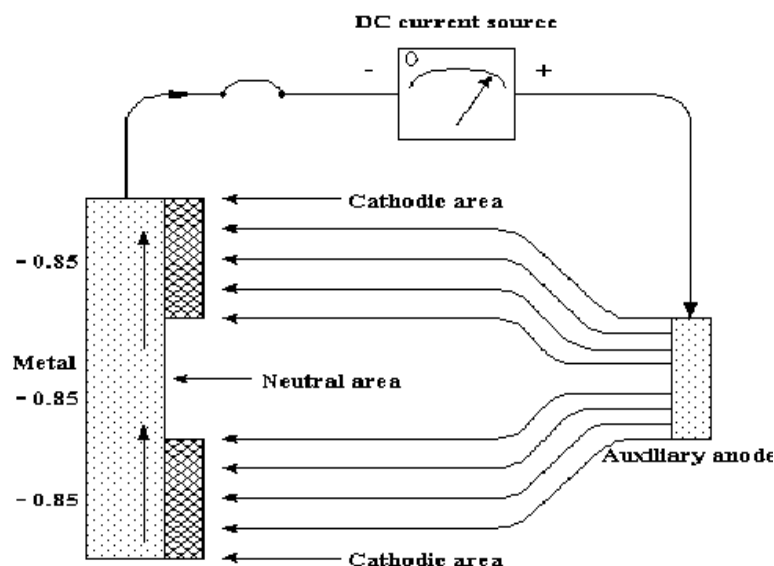
รูปที่ 4.28 สถานะการไหลของกระแสป้องกันการกัดกร่อนในระยะเริ่มต้น

ระยะที่ 3 : รูปที่ 4.29 เป็นการป้องกันการผุกร่อนในช่วงที่สมดุล ซึ่งระยะนี้ปฏิกิริยาทางเคมีเกิดขึ้นมากเต็มที่ที่สามารถจ่ายกระแสตามสภาวะแคโทดเพียงพอ ซึ่งสามารถป้องกันการผุกร่อนของท่อโลหะได้เมื่อใช้หัวจัดแบบ Cu/Cu₂SO₄ วัดจะเห็นว่าค่า Polarization ระหว่างพื้นที่ของแอโนดและแคโทด ขณะนี้มีค่าเท่ากัน ซึ่งท่อจะหยุดการผุกร่อน แต่ยังสามารถผุกร่อนได้อีกหากมีปัจจัยตัวอื่นๆ เปลี่ยนไป



รูปที่ 4.29 สถานะการไหลของกระแสป้องกันการกัดกร่อนในช่วงสมดุล

ระยะที่ 4 : รูปที่ 4.30 เป็นการป้องกันการผุกร่อนของโลหะที่สมบูรณ์ ซึ่งสามารถวัดค่า Polarization ของโลหะได้มากกว่า 100 มิลลิโวลต์ ซึ่งตอนนี้จะเห็นว่าปฏิกิริยาเคมีสมบูรณ์แล้ว และสามารถจ่ายกระแสได้คงที่ ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐาน NACE std. RP 0169-1992 section 2



รูปที่ 4.30 สภาวะของท่อโลหะที่ไม่มีการผุกร่อน

หลักและวิธีการทดสอบระบบป้องกันการผุกร่อนตามมาตรฐาน NACE Standard RP 0169-1992

มาตรฐาน NACE Standard ได้กล่าวเกี่ยวกับวิธีการทดสอบระบบป้องกันการผุกร่อนของระบบท่อไว้ดังนี้

ในการวัดและเก็บข้อมูลค่าความต่างศักย์ระหว่างท่อส่งน้ำมันหรือก๊าซเทียบกับดินในบริเวณใกล้เคียง โดยทำการวัดด้วยมิเตอร์วัดค่าแรงดันที่มีความละเอียดสูง และหัววัด Cu/Cu₂SO₄ ซึ่งขั้วลบ(-) ของมิเตอร์ต่อเข้ากับ Cu/Cu₂SO₄ ส่วนขั้วบวก (+) ของมิเตอร์ ต่อเข้ากับจุดทดสอบ ซึ่งจุดนี้จะอยู่กับท่อส่งน้ำมันหรือก๊าซและตัวอิเล็กโทรด ซึ่งหากท่อส่งน้ำมันหรือก๊าซมีคุณสมบัติส่วนใหญ่เป็นหลัก ก็สามารถวัดค่าได้ประมาณ -0.55 โวลต์ ที่ 25 องศาเซลเซียส การเก็บข้อมูลของค่านี้ควรเก็บทุกจุดตามจุด Test post ที่ติดตั้งตลอดแนวท่อส่งน้ำมันหรือก๊าซ ซึ่งค่านี้เป็นค่าที่สำคัญมากในการเปรียบเทียบ จากนั้นก็เปิดระบบป้องกันการผุกร่อนทั้งหมด หากเป็นระบบขนาดใหญ่ควรเปิดไว้ประมาณ 24-48 ชั่วโมง

โดยปกติค่าศักย์ไฟฟ้าธรรมชาติจะอยู่ประมาณ -0.55 โวลต์ แต่เมื่อเราเปิดระบบป้องกันการผุกร่อนแบบทันทีทันใดนั้น จะทำให้กระแสจากชุดแหล่งจ่ายไปกระตุ้นให้แอโนดทุกตัวปลดปล่อยพลังงานออกมาพร้อมๆ กันในรูปของแรงดัน หากเราใช้เครื่องมือวัดไปวัดค่า Polarization

จะเห็นว่าขณะนี้ค่า Polarization ระหว่างท่อส่งน้ำมันหรือก๊าซกับตัวอิเล็กโตรด 1 Cu/Cu₂SO₄ จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จนกว่าการแตกตัวของโมเลกุลของท่อส่งน้ำมันหรือก๊าซจะค่อยๆ ลดลง และหยุดการแตกตัวในที่สุด ซึ่งขณะนี้ค่า Polarization มีค่าคงที่ (Steady State)

ในการทดสอบระบบนั้นต้องปิดระบบป้องกันการสุกร่อนอย่างทันทีทันใด ซึ่งจะทำให้ค่าแรงดันตกลงจากค่าแรงดันปกติอย่างรวดเร็ว คือ -0.85 โวลต์ หากค่า Instant off แตกต่างจากค่าศักย์ธรรมชาติมากกว่า 100 มิลลิโวลต์ขึ้นไป แสดงว่าระบบสามารถป้องกันการสุกร่อนได้ ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานของ NACE Standard RP 0169-1992 section 6.2.2.1.3

สำหรับการออกแบบระบบป้องกันการสุกร่อนแบบ Impressed Current นั้นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงมีดังนี้

- ขนาดของท่อและลักษณะผิวนอกท่อ
- ลักษณะการติดตั้งของชิ้นงาน เช่น ท่อฝังดิน, ท่อใต้น้ำ
- สิ่งก่อสร้างที่อยู่ใกล้เคียง ซึ่งทำด้วยโลหะ
- ระบบไฟฟ้าที่มีอยู่ในสถานที่นั้นๆ

เมื่อเราทราบองค์ประกอบต่างๆ แล้วก็ทำการเก็บข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับระบบท่อที่ต้องการป้องกันและนำมาทำการออกแบบระบบ

■ ลักษณะการออกแบบระบบป้องกันการสุกร่อนแบบ Impressed Current

- | | | | |
|-------------------------------|---|-----|------|
| - ท่อโลหะขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง | = | 4 | นิ้ว |
| - ความยาวของท่อ | = | 1 | เมตร |
| - ท่ออยู่ใต้พื้นดิน | = | 0.5 | เมตร |



รูปที่ 4.31 ท่อโลหะขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้วที่ต้องการป้องกันการสุกร่อน

■ การหากระแสไฟฟ้าที่ระบบต้องการป้องกันการผุกร่อนแบบ Imperss Current

1. เงื่อนไขเบื้องต้น

- จำนวนปีที่ต้องการป้องกัน = 20 ปี
- ค่าความหนาแน่นกระแส = 134.712 มิลลิแอมป์/ตารางเมตร
- ค่าสภาพต้านทานของดิน = 750 โอห์ม – เซนติเมตร

2. กระแสไฟฟ้าที่ระบบต้องการ

$$I_r = \frac{\text{Average Current Density} * \text{Pipe Surface Area}}{1000} \quad (4.31)$$

$$I_r = \frac{134.712 * 0.3192}{1000}$$

$$I_r = 0.043 \text{ แอมแปร์}$$

เมื่อแทนค่าลงในสมการจะได้ค่ากระแสไฟฟ้าที่ระบบต้องการเป็น $I_r = 0.043$ แอมแปร์

3. น้ำหนัก และจำนวนแท่งแอโนดที่ใช้

การคำนวณน้ำหนักของแท่งแอโนดสามารถแสดงได้ดังนี้

$$W = \frac{I_r * C * Y}{U} \quad (4.32)$$

เมื่อ W คือ น้ำหนักของแท่งแอโนดที่ใช้

I_r คือ กระแสที่ใช้ในระบบ มีค่าเท่ากับ 43 มิลลิแอมป์

C คือ อัตราการผุกร่อนของแท่งแอโนด มีค่าเท่ากับ 8 กิโลกรัมต่อแอมป์ต่อปี

Y คือ จำนวนปีที่ต้องการป้องกัน มีค่าเท่ากับ 20 ปี

U คือ ค่าปัจจัยการใช้ประโยชน์ มีค่าเท่ากับ 0.85

ดังนั้นจะได้น้ำหนักของแท่งแอโนดเป็น

$$W = \frac{43mA * 20 * 8}{0.85}$$

$$W = 8.094 \text{ กิโลกรัม}$$

การคำนวณจำนวนแท่งแอโนดที่ใช้สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\text{Quantity of Anode} = \frac{\text{AnodeWeigh (kg)}}{\text{AnodeWeigh per each (kg / each)}} \quad (4.33)$$

Anode weigh คือ น้ำหนักแอโนดที่คำนวณได้ มีค่าเท่ากับ 8.094 กิโลกรัม

Anode weigh per each คือ น้ำหนักแอโนดต่อ 1 แท่ง มีค่าเท่ากับ 4.25 กิโลกรัมต่อชิ้น

เมื่อน้ำหนักของแท่งแอโนดต่อ 1 แท่งเป็น 4.25 กิโลกรัม และระบบต้องการแอโนดขนาด 8.094 กิโลกรัม จะสามารถหาจำนวนแท่งแอโนดที่ใช้ได้เป็น 1.90 ชิ้น นั่นคือการใช้แอโนด 2 ชิ้น ก็เพียงพอสำหรับระบบดังกล่าว โดยแอโนดที่ใช้เป็นชนิดแมกนีเซียมแอโนด

4. ความต้านทานเมื่อมีการวางท่อในแนวตั้ง

$$Ra = \frac{0.00521 \rho}{NL} \left[2.3 \log \frac{8L}{d} - 1 + \left(\frac{2L}{s} * 2.3 \log 0.656N \right) \right] \quad (4.34)$$

Ra : ค่าความต้านทานเมื่อมีการวางท่อในแนวตั้ง (โอห์ม)

ρ : ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน (Soil Resistivity) = 659.30 โอห์ม-เซนติเมตร

N : จำนวนแอโนดที่นำมาต่อขนาน (Number of Anode) = 2 ชิ้น

L : ความยาวของแท่งแอโนด (Anode Length) = 15 เซนติเมตร

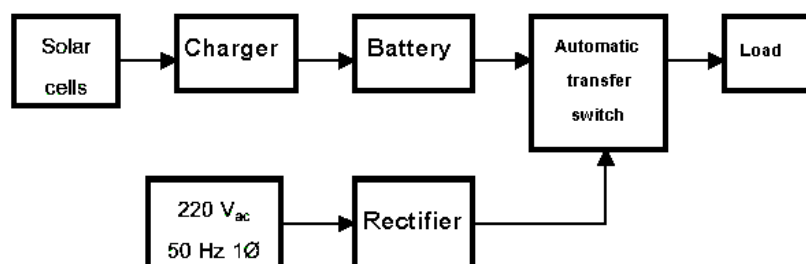
d : เส้นผ่าศูนย์กลางของแท่งแอโนด (Dimeter of Anode) = 6 เซนติเมตร

s : สองเท่าของระยะความลึกแอโนด (Twice Depth of Anode) = 100 เซนติเมตร

ดังนั้นจะได้ความต้านทานเมื่อมีการวางท่อในแนวนอนเป็น

$$Ra = 0.2188 \text{ โอห์ม}$$

โดยมีความต้องการแรงดันของระบบเป็น $E = 12$ โวลต์ เมื่อทราบค่าแรงดันขาออกแล้ว เราสามารถกำหนดแหล่งจ่ายไฟให้กับระบบได้ โดยควรต้องมีเพื่อการออกแบบไว้ สำหรับความผิดปกติเมื่อนำไปติดตั้งใช้งานจริง อันเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ และองค์ประกอบบางตัวไปจากค่าเดิมที่ได้พิจารณาไว้ในตอนต้น เช่น สภาพความต้านทานของดิน เป็นต้น



รูปที่ 4.32 ระบบการทำงานของชุดป้องกันการฟุกร่อนของท่อโลหะ



รูปที่ 4.33 อุปกรณ์ประกอบการติดตั้งใช้งานของชุดป้องกันการฟุกร่อนของท่อโลหะ

การพิจารณาเลือกขนาดแบตเตอรี่คิดคำนวณจากกำลังไฟฟ้าที่ระบบป้องกันการฟุกร่อนของท่อโลหะ ต้องการใช้ในวัน

$$\begin{aligned} \text{ใช้ไฟขนาด } 0.516 \text{ วัตต์ เป็นเวลา } 24 \text{ ชั่วโมงต่อวัน} &= 0.516 * 24 \\ &= 12.384 \text{ วัตต์ต่อวัน} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{คิดเป็นปริมาณกระแสไฟฟ้าในหนึ่งวัน (แบตเตอรี่ } 12 \text{ โวลท์)} &= \frac{12.384}{12} \\ &= 1.032 \text{ แอมป์ต่อวัน} \end{aligned}$$

โดยปกติกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในแต่ละวันควรอยู่ระหว่าง 20-25 % ของขนาดแบตเตอรี่หรืออย่างมากไม่เกิน 30%

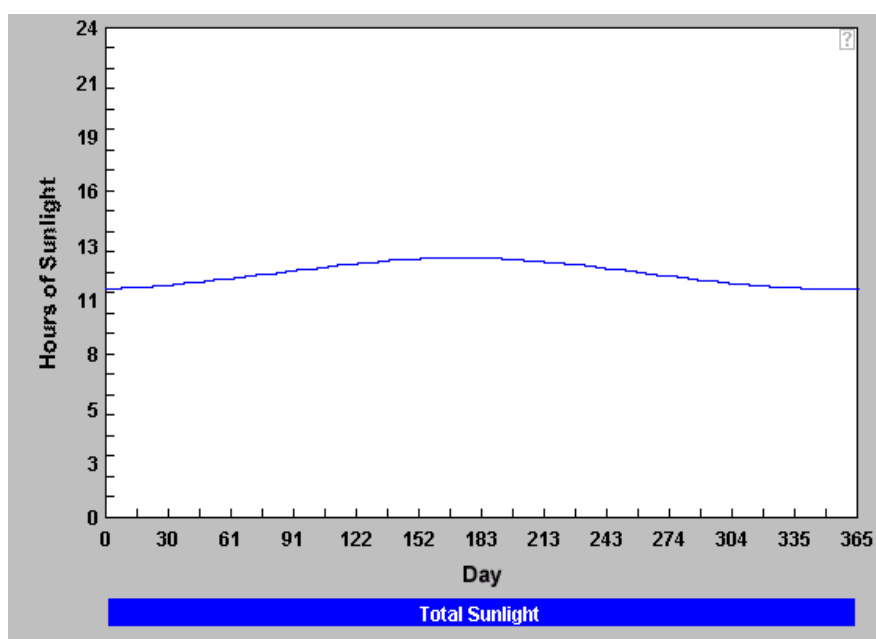
$$\begin{aligned} \text{โดยมีขนาดแบตเตอรี่ที่ควรใช้เป็น} &= \frac{1.032 * 100}{25} \\ &= 4.128 \text{ แอมป์ต่อชั่วโมง} \end{aligned}$$

แบตเตอรี่ที่ใช้มีขนาด 7.5 แอมป์- ชั่วโมงที่ระดับแรงดัน 12 โวลท์

เมื่อแบตเตอรี่สูญเสียกระแสวันละ 1.032 แอมป์ เพราะฉะนั้นจะต้องใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ที่สามารถประจุไฟได้วันละ 1.032 แอมป์เป็นอย่างต่ำ จากการคำนวณปริมาณกระแสที่แบตเตอรี่จะต้องจ่ายให้กับชุดป้องกันการฟุกร่อนของท่อโลหะ มีปริมาณเท่ากับ 1.032 แอมป์ต่อวัน นอกจากนี้แผงเซลล์แสงอาทิตย์จะต้องอัดประจุกลับให้แก่แบตเตอรี่ที่มีขนาดหลังจากการเผื่อค่าแล้วเท่ากับ 4.128 แอมป์ต่อชั่วโมง เพื่อให้เพียงพอต่อการใช้งานในวันต่อไป และมีสำรองเผื่อไว้

ในกรณีที่อาจจะเกิดความผิดพลาดขึ้นกับระบบได้ การคำนวณหาขนาดแผงเซลล์แสงอาทิตย์สิ่งที่ต้องคำนึงถึงคือกระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าที่ต้องจ่ายให้กับระบบ จากข้อมูลสถิติความยาวนานแสงแดดเฉลี่ยในประเทศไทยที่สามารถใช้งานกับระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ได้วันละ 5 ชั่วโมงโดยประมาณ(จากข้อมูลในภาคผนวก ค.) โดยพิจารณาร่วมกับค่าความยาวนานแสงแดดเฉลี่ยแต่ละวันในรอบปี ดังแสดงในรูปที่ 4.34 เพราะฉะนั้นขนาดกระแสที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่จะต้องจ่ายให้กับแบตเตอรี่เท่ากับ 0.825 แอมป์ เมื่อคิดค่าเฟล็กเตอร์และการเผื่อค่าต่างๆ ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แล้ว จะใช้เลือกใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิกอน รุ่น S13 ของบริษัทโซลาร์ตรอน จำกัด โดยมีพิกัดดังนี้

- ขนาดพิกัดกำลัง 13.59 วัตต์
- แรงดันไฟฟ้าปกติ 16.45 โวลท์
- แรงดันไฟฟ้าเมื่อเปิดดวงจร 21.46 โวลท์
- กระแสไฟฟ้าปกติ 0.83 แอมแปร์
- กระแสไฟฟ้าเมื่อลัดวงจร 0.92 แอมแปร์



รูปที่ 4.34 ความยาวนานแสงแดดเฉลี่ยแต่ละวันในรอบปี ณ ตำแหน่งละติจูดที่ 13 องศาเหนือ

สำหรับอุปกรณ์ประกอบอื่นๆ อันได้แก่ แอโนดที่ใช้เป็นชนิดแมกนีเซียมแอโนด ของบริษัท ANOTEC INDUSTRIES LTD. สายไฟฟ้าเลือกใช้ขนาด NYN 1/10 sq.mm โดยสามารถดูภาพของอุปกรณ์ประกอบต่างๆ พร้อมทั้งการพิจารณาค่าได้ในภาคผนวก ข. และภาคผนวก ช. ตามลำดับ

■ การวัดค่าเพื่อหาสภาพต้านทานของดิน

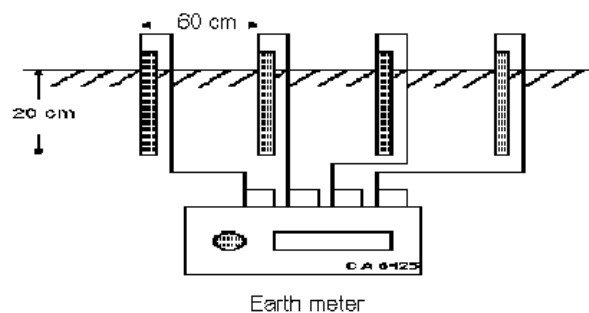
กำหนดให้ระยะระหว่างแท่งตัวนำห่างกัน	60	เซนติเมตร
ความลึกที่ปักลงในดิน	20	เซนติเมตร
เมื่อทำการวัด มิเตอร์อ่านค่าได้	1.5	โอห์ม

จาก
$$\rho = \frac{4\pi AR}{\left[1 + \frac{2A}{\sqrt{A^2 + 4B^2}} - \frac{A}{\sqrt{A^2 + B^2}}\right]}$$
 (4.35)

โดย

ρ	คือ	ความต้านทานจำเพาะ
A	คือ	ระยะห่างระหว่างแท่งตัวนำ (เซนติเมตร)
B	คือ	ความลึกของแท่งตัวนำที่ปักลงในดิน (เซนติเมตร)
R	คือ	ค่าความต้านทานจากการทดสอบ (โอห์ม)

ในการออกแบบจึงเลือกใช้ค่าสภาพต้านทานของดิน เท่ากับ 659.30 โอห์ม-เซนติเมตร



รูปที่ 4.35 วิธีการวัดเพื่อหาค่าสภาพต้านทานของดิน

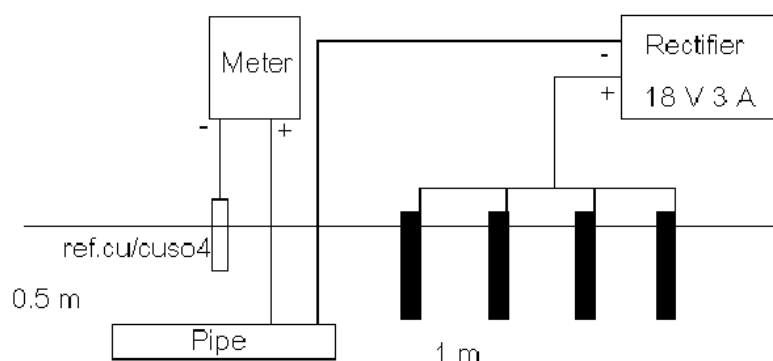
■ การหาค่าความหนาแน่นกระแส

โดยสามารถแสดงผลการคำนวณค่าได้ดังนี้

- ค่ากระแสที่อ่านได้	=	43 มิลลิแอมป์
- ท่อมีเส้นผ่าศูนย์กลาง	=	4 นิ้ว
- ท่อมีความยาว	=	1 เมตร
- พื้นที่ของท่อโลหะที่ต้องการป้องกัน	=	$\pi * D * L$

$$= 0.3192 \text{ ตารางเมตร}$$

เพราะฉะนั้นจะได้ค่าความหนาแน่นกระแสต่อพื้นที่เท่ากับ 134.712 มิลลิแอมป์/ตารางเมตร



รูปที่ 4.36 วิธีการวัดเพื่อหาค่าความหนาแน่นกระแส

4.5 บทสรุป

จากผลการคำนวณการประมาณค่าเพื่อหาเส้นที่เหมาะสมจากฟังก์ชันตัวอย่าง โดยใช้ฟังก์ชันพหุนาม ด้วยอันดับในการประมาณค่าที่เหมาะสมจะทำให้ได้ค่าผลรวมของค่าที่ผิดพลาดมีค่าต่ำ และเส้นที่เหมาะสมที่ใช้ในการประมาณค่า สามารถใช้แทนข้อมูลได้ถึง 100% ($r^2 = 1$)

จาส่วนในกรณีการประมาณค่าเพื่อหาเส้นที่เหมาะสมจากข้อมูลของระบบจริง โดยใช้ฟังก์ชันพหุนาม ด้วยอันดับในการประมาณค่าที่เหมาะสมสามารถใช้แทนข้อมูลได้มากกว่า 90 % ($r^2 > 0.9$) แต่ทั้งนี้ควรต้องพิจารณาถึงค่าผิดพลาดในส่วนอื่นประกอบด้วยอันได้แก่ ค่าผิดพลาดเพราะปัดเศษ (Round-off Error) และค่าผิดพลาดเพราะตัดปลาย (Truncation Error)

การอินทิเกรตเชิงตัวเลขที่ผ่านมาทั้งสามรูปแบบ ความแม่นยำของการคำนวณด้วยฟังก์ชัน trapz, quad และ quad8 อย่างหนึ่งที่เราควรชี้ให้เห็นก็คือถ้าหากว่าต้องการเพิ่มความถูกต้องให้มากขึ้นสามารถทำได้ดังนี้

- ในการใช้ trapz ให้เพิ่มจุดของการอินทิเกรตมากขึ้น
- สำหรับการใช้ quad8 และ quad8 สามารถทำได้โดยลดค่า tol ให้ต่ำลง โดยฟังก์ชัน quad และ quad8 กำหนดค่าเบื้องต้นไว้ที่ 0.001