

การจำลองระบบควบคุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเทอร์โมอิเล็กทริก
Simulation Model for the Control System of Thermoelectric Generator

รุ่งอรุณ โปธิ์ตุน

Rung-aroon Photoon

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Engineering in Electrical Engineering
Prince of Songkla University**

2559

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



การจำลองระบบควบคุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเทอร์โมอิเล็กทริก
Simulation Model for the Control System of Thermoelectric Generator

รุ่งอรุณ โปธิ์ตู่
Rung-aroon Photoon

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Engineering in Electrical Engineering
Prince of Songkla University**

2559

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การจำลองระบบควบคุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเทอร์โมอิเล็กทริก
ผู้เขียน นาย รุ่งอรุณ โพธิ์ตุ่น
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....
(ดร. วรฤทธิ์ วิชกุล)

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กุสุมาลย์ เฉลิมยานนท์)

.....กรรมการ
(ดร. วรฤทธิ์ วิชกุล)

.....กรรมการ
(ดร. มงคล แซ่เจียว)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วีระชัย MALAYWEH)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา
วิศวกรรมไฟฟ้า

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร. วีระพล ศรีชนะ)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้เป็นผลมาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณ
บุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ.....

(ดร. วรุทธิ์ วิชกุล)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ.....

(นาย รุ่งอรุณ โพธิ์คุ่น)

นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นาย รุ่งอรุณ โพธิ์ตุ่น)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์ การจำลองระบบควบคุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเทอร์โมอิเล็กทริก
 ผู้เขียน นาย รุ่งอรุณ โพธิ์คุ่น
 สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
 ปีการศึกษา 2558

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอเกี่ยวกับการออกแบบและการควบคุม แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเทอร์โมอิเล็กทริก (TEG) โดยใช้วิธีควบคุมพีไอดี เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำให้แบบจำลอง TEG มีแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตสูงสุดเท่ากับ 7.67 V ภายในเวลาน้อยกว่า 60 นาที และใช้ความดันก๊าซธรรมชาติไม่เกิน 10 psi ซึ่งในการวิจัยนี้ได้ศึกษาแรงดันไฟฟ้าที่เครื่อง TEG ผลิตได้ และเวลาที่แบบจำลอง TEG ตอบสนองเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าความดันก๊าซ ในการศึกษาเราใช้ระดับความดันก๊าซธรรมชาติที่ 1.6 – 2.0 psi กับเครื่อง TEG ในการเก็บข้อมูลแรงดันไฟฟ้าเปรียบเทียบกับเวลา เพื่อออกแบบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ TEG โดยใช้กระบวนการอันดับหนึ่งซึ่งมีเวลาไครการตอบสนอง (FOPDT) และจำลองการทำงานในโปรแกรม MATLAB Simulink ผลการทดสอบที่ความดันก๊าซระดับเดียวกันแบบจำลองสามารถจำลองค่าแรงดันไฟฟ้าได้เท่ากับกับเครื่อง TEG โดยมีค่าแรงดันเท่ากับ 7.67 V และใช้เวลาในการทำให้ได้แรงดันไฟฟ้าเข้าสู่ภาวะสมดุลเท่ากับเครื่องจักรคือ 40 นาที จากนั้นทำการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีและปรับแต่งด้วยพารามิเตอร์แบบ Dahlin synthesis เปรียบเทียบกับพารามิเตอร์แบบ Quarter decay ratio โดยจำลองการทำงานในโปรแกรม MATLAB Simulink ผลการทดลองการทำงานของแบบจำลองพบว่าพารามิเตอร์แบบ Dahlin synthesis ใช้เวลาในการเข้าถึงค่าแรงดันสูงสุดเท่ากับ 10 นาที ซึ่งเร็วกว่าแบบ Quarter decay ratio ซึ่งใช้เวลา 15 นาที แต่พบค่าพุ่งเกินของความดันก๊าซธรรมชาติซึ่งมีค่าเท่ากับ 12 psi หลังจากนั้นเราใช้แบบจำลองการควบคุม Dahlin synthesis และทำการจำกัดความดันก๊าซธรรมชาติที่ 10 psi ผลตอบสนองแรงดันไฟฟ้าที่ได้มีการพุ่งเกินของแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 7.97 V เราพิจารณาใช้หลักการ Anti-windup เพื่อลดค่าพุ่งเกินของแรงดันไฟฟ้าโดยยังคงจำกัดความดันก๊าซธรรมชาติที่ 10 psi เท่าเดิม ผลตอบสนองที่ได้ไม่เกิดการพุ่งเกินของแรงดันไฟฟ้าและใช้เวลาเข้าสู่ภาวะสมดุล 55 นาที รวมทั้งใช้ความดันก๊าซธรรมชาติสูงสุดเท่ากับ 7.66 psi ในการทดสอบนี้ยืนยันได้ว่าแบบจำลองที่นำเสนอสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานเพื่อศึกษาการทำงานของเครื่อง TEG ได้จริง

คำสำคัญ: เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเทอร์โมอิเล็กทริก, กระบวนการแบบอันดับหนึ่งมีเวลาไครการตอบสนอง, ดาห์ลิน

| | |
|----------------------|---|
| Thesis Title | Simulation model for the control system of thermoelectric generator |
| Author | Mr. Rung-aroon Photoon |
| Major Program | Electrical Engineering |
| Academic Year | 2015 |

ABSTRACT

This paper presents the design and control of thermoelectric generator (TEG) modules using PID controller to optimize the TEG model produces output voltage 7.67 V within operating time 60 minutes and use gas fuel pressure less than 10 psi. In this research, we study the output voltage produced from TEG model and time when fuel gas pressure changes. In this study, we used level of fuel gas pressure 1.6 – 2.0 psi with TEG machine to keep voltage output versus time. The TEG simulation module implemented by using first order plus dead time (FOPDT) model in MATLAB Simulink program. In simulation, MATLAB Simulink was used to verify output response of the TEG machine and the simulation model with the same level of fuel gas pressure both TEG machine and simulation model that produced the same level of output voltage 7.67 V and used time to reach steady state of 40 minutes. Furthermore, the control PID tuning by Dahlin synthesis and Quarter decay ratio were designed in MATLAB Simulink program. The results shown that Dahlin synthesis controller had a settling time around 10 minutes, which was faster than Quarter decay ratio that used 15 minutes. However, we found that the pressure had an overshoot value of 12 psi. To fix this issue, we used a PID tuning by Dahlin synthesis and limited gas pressure at 10 psi and monitored the voltage output versus time. For the test results we found that output voltage overshoots around 7.97 V then we used an anti-windup theory to reduce the voltage overshoot. The anti-windup block was setup in the PID window and the input gas pressure still limited at 10 psi. The results shown that no overshoot voltage but the settling time increased to 55 minutes. This test can verify that the model can be applied to study the TEG system.

Keywords: Thermoelectric generator, FOPDT, Dahlin synthesis

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ดร. วฤทธิ์ วิชกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่ได้อุทิศเวลาให้คำปรึกษา ชี้แนะแนวทาง ให้กำลังใจในการทำงาน และให้ความรู้ในด้านต่างๆ รวมถึงให้การสนับสนุนในเรื่องอุปกรณ์ในการทำวิจัย ตลอดจนช่วยตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้เป็นไปอย่างสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ณีฎฐา จินดาเพ็ชร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ และให้ความช่วยเหลือในงานวิจัย ตลอดจนช่วยตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้ดำเนินไปอย่างสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กุศุมลย์ เณนิยานนท์ ที่ได้กรุณาอุทิศเวลามาเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ดร. มงคล แซ่เจีย ที่กรุณาอุทิศเวลาเดินทางมาเป็นกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิในการสอบวิทยานิพนธ์ อีกทั้งตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วีระชัย มาลัยเวช ที่กรุณาอุทิศเวลาเดินทางมาเป็นกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิในการสอบวิทยานิพนธ์ อีกทั้งตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ และเจ้าหน้าที่ในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่าน ที่ได้ให้คำปรึกษา และให้การช่วยเหลือในด้านต่างๆ มาโดยตลอด จนกระทั่งงานสำเร็จลุล่วง

ขอขอบพระคุณ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้การสนับสนุนทุนในการทำวิจัยและให้ความช่วยเหลือด้านการประสานงานต่างๆ

ขอขอบคุณเพื่อนๆ นักศึกษา พี่น้องร่วมภาควิชา ที่ได้เป็นกำลังใจ และคอยชี้แนะกระตุ้นเตือนจนข้าพเจ้าได้ทำงานสำเร็จลุล่วง

และสุดท้าย ขอโน้มรำลึกถึงพระคุณบิดา มารดา ที่ส่งเสริมให้กำลังใจ และให้การสนับสนุนในเรื่องต่างๆ จนกระทั่งข้าพเจ้าประสบความสำเร็จในการศึกษา

รุ่งอรุณ โพธิ์ตุ่น

สารบัญ

| | หน้า |
|--|-----------|
| กิตติกรรมประกาศ | 7 |
| สารบัญ | 8 |
| รายการตาราง | 10 |
| รายการภาพประกอบ | 11 |
| บทที่ 1 | 16 |
| 1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย | 16 |
| 1.2 การตรวจเอกสาร บทความ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 16 |
| 1.3 วัตถุประสงค์ | 26 |
| 1.4 ขอบเขตของการวิจัย | 26 |
| 1.5 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงานวิจัย | 26 |
| 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ | 27 |
| 1.7 ทรัพยากรที่ใช้ในการพัฒนาระบบ | 27 |
| 1.8 แผนการดำเนินการวิจัย | 28 |
| บทที่ 2 | 29 |
| 2.1 ความหมายของเทอร์โมอิเล็กทริก | 29 |
| 2.2 ปฏิกิริยาการฉีกเซมิคอนดักเตอร์ | 30 |
| 2.3 ปฏิกิริยาการฉีกเพอร์มิตทีฟ | 32 |
| 2.4 ปฏิกิริยาการฉีกทอมสัน | 34 |
| 2.5 ตัวควบคุมแบบ PID controller | 35 |
| 2.6 กระบวนการแบบอันดับหนึ่ง | 40 |
| 2.7 เวลาไร้การตอบสนอง (Dead time) | 42 |
| 2.8 กระบวนการอันดับหนึ่งที่มีเวลาไร้การตอบสนอง (FOPDT) | 44 |
| 2.9 การสังเคราะห์พารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ด้วยวิธีการของดาห์ลลิน (Dahlin) | 48 |
| 2.10 การปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ด้วยวิธี Quarter decay ratio | 53 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| บทที่ 3 | 56 |
| 3.1 การทำงานของระบบและภาพรวมในการออกแบบ | 56 |
| 3.2 การออกแบบ TEG module | 57 |
| 3.3 การออกแบบแบบจำลองของตัวควบคุม TEG | 67 |
| 3.4 การออกแบบแบบจำลองของระบบเมื่อทำงานกับ โหลดทางไฟฟ้า | 70 |
| บทที่ 4 | 75 |
| 4.1 แนวทางการทดลองและการเก็บผลการทดลอง | 76 |
| บทที่ 5 | 102 |
| 5.1 สรุป | 102 |
| 5.2 ปัญหา | 103 |
| 5.3 ข้อเสนอแนะ | 103 |
| บรรณานุกรม | 105 |
| ภาคผนวก | 108 |
| ภาคผนวก ก : TEG operating manual | 109 |
| ภาคผนวก ข : การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน | 122 |
| ประวัติผู้เขียน | 131 |

รายการตาราง

| ตาราง | หน้า | |
|--------------|---|-----|
| ตาราง 1-1 | การวิเคราะห์หลักการของบทความเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเทอร์โมอิเล็กทริก | 20 |
| ตาราง 1-2 | แผนการดำเนินการวิจัย | 28 |
| ตาราง 2-1 | การสังเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของดาห์ลิน [26] | 52 |
| ตาราง 2-2 | การสังเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของ Quarter decay ratio [26] | 54 |
| ตาราง 3-1 | ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดวัดจากเครื่องจักร โดยตั้งค่าใช้งานความดันก๊าซค่าต่างๆ | 66 |
| ตาราง 3-2 | สมการการปรับจูนค่าตัวแปรของ Quarter decay ratio และ Dahlin synthesis [26] | 68 |
| ตาราง 3-3 | ค่าตัวแปรต่างๆของตัวควบคุม PID แบบ Quarter decay ratio และ Dahlin synthesis | 69 |
| ตาราง 3-4 | ค่าความต้านทานภายในของ TEG จากการคำนวณ | 71 |
| ตาราง 4-1 | ผลตอบสนองที่ได้จากแบบจำลองเมื่อย้ายความดันก๊าซ 1.6 psi ถึง 2.4 psi | 76 |
| ตาราง 4-2 | เปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าระหว่างเครื่องจักรและแบบจำลอง ที่โหลดค่าต่างๆ | 82 |
| ตาราง 4-3 | ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกลงเมื่อต่อโหลดค่าต่างๆ | 83 |
| ตาราง 4-4 | ผลตอบสนองทางเวลาของแบบจำลองเมื่อต่อใช้งานระบบควบคุม Dahlin Synthesis และ Quarter decay ratio | 85 |
| ตาราง 4-5 | ผลตอบสนองของแรงดันและกระแสที่ตกลง เมื่อใช้งานตัวควบคุม Dahlin synthesis ควบคู่กับ โหลดภายนอกค่าต่างๆ | 89 |
| ตาราง 4-6 | เปรียบเทียบผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของระบบ ที่มีการใช้งาน Anti-windup และไม่มีการใช้ Anti-windup | 100 |
| ตาราง 4-7 | เปรียบเทียบผลตอบสนองของความดันก๊าซของระบบที่มีการใช้งาน Anti-windup และไม่มีการใช้ Anti-windup | 101 |

รายการภาพประกอบ

| ภาพประกอบ | | หน้า |
|----------------|---|------|
| ภาพประกอบ 1-1 | แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเทอร์โมอิเล็กทริก โดยใช้ตัวจำลอง MATLAB | 27 |
| ภาพประกอบ 2-1 | ความต่างศักย์เชิงเบกและการไหลของกระแสไฟฟ้า | 30 |
| ภาพประกอบ 2-2 | การไหลเวียนของความร้อนและกระแสไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ กรณีค่าสัมประสิทธิ์เพลเทียร์เป็นลบ | 33 |
| ภาพประกอบ 2-3 | การไหลเวียนของความร้อนและกระแสไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ กรณีค่าสัมประสิทธิ์เพลเทียร์เป็นบวก | 33 |
| ภาพประกอบ 2-4 | วงจรถอร์โมไดนามิกของปรากฏการณ์ทอมสัน | 33 |
| ภาพประกอบ 2-5 | แผนผังโครงสร้างตัวควบคุมแบบสัดส่วนรวมกับแบบปริพันธ์ | 35 |
| ภาพประกอบ 2-6 | บล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุมแบบสัดส่วน | 36 |
| ภาพประกอบ 2-7 | ลักษณะของการประมวลผลสัญญาณของตัวควบคุมแบบสัดส่วน | 36 |
| ภาพประกอบ 2-8 | บล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุมแบบปริพันธ์ | 37 |
| ภาพประกอบ 2-9 | ลักษณะของการประมวลผลสัญญาณของตัวควบคุมแบบปริพันธ์ | 37 |
| ภาพประกอบ 2-10 | บล็อกไดอะแกรมของ Anti-windup tracking point | 38 |
| ภาพประกอบ 2-11 | บล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ | 39 |
| ภาพประกอบ 2-12 | ลักษณะของการประมวลผลสัญญาณของตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ | 39 |
| ภาพประกอบ 2-13 | แผนภาพบล็อกของระบบอันดับหนึ่ง | 41 |
| ภาพประกอบ 2-14 | ตำแหน่งของโพลบน s-plane ของระบบอันดับหนึ่ง | 41 |
| ภาพประกอบ 2-15 | แสดงผลตอบสนองเชิงเวลาของ 1 st order lag | 42 |
| ภาพประกอบ 2-16 | ปัญหาของการขนส่งเนื่องจากเวลาไร้การตอบสนอง | 43 |
| ภาพประกอบ 2-17 | เวลาไร้การตอบสนองเนื่องจากเวลาไร้การตอบสนอง | 43 |
| ภาพประกอบ 2-18 | บล็อกไดอะแกรมของการทดสอบแบบวงเปิดโดยการป้อนสัญญาณ ขั้นบันได | 45 |
| ภาพประกอบ 2-19 | ผลตอบสนองของกระบวนการแบบวงเปิดต่อสัญญาณขั้นบันได | 45 |
| ภาพประกอบ 2-20 | การพิจารณาหาค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการแบบ FOPDT | 47 |

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

| ภาพประกอบ | | หน้า |
|----------------|--|------|
| ภาพประกอบ 2-21 | บล็อกไดอะแกรมของการสังเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID | 48 |
| ภาพประกอบ 2-22 | ผลตอบสนองแบบวงปิดในรูปแบบอันดับหนึ่ง | 49 |
| ภาพประกอบ 2-23 | ผลตอบสนองแบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาไครการตอบสนองเท่ากับ t_0 | 50 |
| ภาพประกอบ 2-24 | แสดงโครงสร้างของระบบควบคุมแบบ PID | 53 |
| ภาพประกอบ 2-25 | ผลตอบสนองของกระบวนการเมื่อปรับค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีของ Quarter decay ratio | 53 |
| ภาพประกอบ 3-1 | บล็อกไดอะแกรมของแบบจำลองระบบควบคุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเทอร์โมอิเล็กทริก | 56 |
| ภาพประกอบ 3-2 | บล็อกไดอะแกรมสำหรับการทำ Open loop test | 58 |
| ภาพประกอบ 3-3 | ผลตอบสนองของกระบวนการแบบวงเปิดต่อสัญญาณขั้นบันได | 58 |
| ภาพประกอบ 3-4 | แสดงการติดตั้งในการทดลอง | 59 |
| ภาพประกอบ 3-5 | กราฟค่าเฉลี่ยปฏิกิริยาของกระบวนการจากเครื่อง TEG | 60 |
| ภาพประกอบ 3-6 | ผลตอบสนองแรงดันไฟฟ้าเปรียบเทียบเวลาจากการทดลอง | 61 |
| ภาพประกอบ 3-7 | การจำลองบล็อกไดอะแกรมสำหรับตรวจสอบต้นแบบ FOPDT ที่ได้มาสำหรับระบบ TEG | 62 |
| ภาพประกอบ 3-8 | เปรียบเทียบระหว่างการตอบสนองที่เกิดขึ้นจริงและการจำลองโดยใช้แบบจำลอง | 62 |
| ภาพประกอบ 3-9 | แรงดันเอาต์พุตเปรียบเทียบกับเวลา ความดันก๊าซ 2.1-2.4 psi | 63 |
| ภาพประกอบ 3-10 | การจำลองบล็อกไดอะแกรมเมื่อให้ความดันก๊าซเท่ากับ 40%-50% เปรียบเทียบกับความดันก๊าซเท่ากับ 50%-60% | 64 |
| ภาพประกอบ 3-11 | เปรียบเทียบผลตอบสนองของเครื่อง TEG เมื่อให้ความดันก๊าซขาเข้าเท่ากับ 40%-50% และความดันก๊าซขาเข้าเท่ากับ 50%-60% กับการใช้แบบจำลองใน MATLAB | 64 |
| ภาพประกอบ 3-12 | แบบจำลองในการบันทึกค่าแรงดันสูงสุด ในการจ่ายความดันก๊าซ 1.6 psi, 1.8 psi, 2.0 psi, 2.2 psi, และ 2.4 psi ตามลำดับ | 65 |

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

| ภาพประกอบ | | หน้า |
|----------------|--|------|
| ภาพประกอบ 3-13 | การตั้งค่าความดันก๊าซของ TEG ใช้ Digital pressure guage เป็นตัวแสดงผล | 66 |
| ภาพประกอบ 3-14 | แบบจำลอง TEG ทำงานร่วมกับ PID Dahlin synthesis และ Quarter decay ratio บนหน้าต่างของโปรแกรม MATLAB | 69 |
| ภาพประกอบ 3-15 | วงจรมุม Internal resistance ของ TEG | 70 |
| ภาพประกอบ 3-16 | การติดตั้ง TEG เพื่อต่อใช้งานร่วมกับโหลดทางไฟฟ้า | 70 |
| ภาพประกอบ 3-17 | บล็อกไดอะแกรมของระบบที่ไม่ใช้ตัวควบคุมและต่อโหลดทางไฟฟ้า | 73 |
| ภาพประกอบ 3-18 | บล็อกไดอะแกรมของระบบที่ใช้ตัวควบคุม PID และต่อโหลดทางไฟฟ้า | 73 |
| ภาพประกอบ 3-19 | บล็อกไดอะแกรมของระบบที่ใช้ตัวควบคุม PID ต่อโหลดทางไฟฟ้า และจำกัดความดันก๊าซที่ไว้ที่ 4 psi | 74 |
| ภาพประกอบ 4-1 | การจำลองบล็อกไดอะแกรมสำหรับระบบ TEG แบบ Open loop | 75 |
| ภาพประกอบ 4-2 | ผลตอบสนองที่ได้จากแบบจำลองเมื่อย้ายความดันก๊าซ 1.6 psi ถึง 2.4 psi | 76 |
| ภาพประกอบ 4-3 | แบบจำลองทางไฟฟ้าเมื่อมีโหลด $1\ \Omega$ $2\ \Omega$ $5\ \Omega$ และ $10\ \Omega$ | 77 |
| ภาพประกอบ 4-4 | ผลตอบสนองที่ได้จากแบบจำลองเมื่อต่อโหลด $1\ \Omega$ | 78 |
| ภาพประกอบ 4-5 | ผลตอบสนองที่ได้จากแบบจำลองเมื่อต่อโหลด $2\ \Omega$ | 78 |
| ภาพประกอบ 4-6 | ผลตอบสนองที่ได้จากแบบจำลองเมื่อต่อโหลด $5\ \Omega$ | 79 |
| ภาพประกอบ 4-7 | ผลตอบสนองที่ได้จากแบบจำลองเมื่อต่อโหลด $10\ \Omega$ | 79 |
| ภาพประกอบ 4-8 | การติดตั้ง TEG และเครื่องมือวัดเพื่อทำการทดลอง | 80 |
| ภาพประกอบ 4-9 | ผลตอบสนองที่ได้จากเครื่องจักรเมื่อต่อโหลดทางไฟฟ้า $1\ \Omega$ | 80 |
| ภาพประกอบ 4-10 | ผลตอบสนองที่ได้จากเครื่องจักรเมื่อต่อโหลดทางไฟฟ้า $2\ \Omega$ | 81 |
| ภาพประกอบ 4-11 | ผลตอบสนองที่ได้จากเครื่องจักรเมื่อต่อโหลดทางไฟฟ้า $5\ \Omega$ | 81 |
| ภาพประกอบ 4-12 | ผลตอบสนองที่ได้จากเครื่องจักรเมื่อต่อโหลดทางไฟฟ้า $10\ \Omega$ | 82 |
| ภาพประกอบ 4-13 | แบบจำลองเมื่อต่อตัวควบคุมแบบ Dahlin และ Quarter decay ratio | 84 |
| ภาพประกอบ 4-14 | ผลการตอบสนองของระบบที่มีรูปแบบการควบคุม Dahlin synthesis เปรียบเทียบกับรูปแบบการควบคุม Quarter decay ratio | 84 |

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

| ภาพประกอบ | | หน้า |
|------------------|---|-------------|
| ภาพประกอบ 4-15 | บล็อกไดอะแกรมของระบบที่มีการใช้การควบคุม Dahlin Synthesis และต่อโหลดทางไฟฟ้า | 86 |
| ภาพประกอบ 4-16 | ผลตอบสนองที่ได้จากระบบ Dahlin synthesis เมื่อต่อโหลดทางไฟฟ้า 1Ω | 86 |
| ภาพประกอบ 4-17 | ผลตอบสนองที่ได้จากระบบ Dahlin synthesis เมื่อต่อโหลดทางไฟฟ้า 2Ω | 87 |
| ภาพประกอบ 4-18 | ผลตอบสนองที่ได้จากระบบ Dahlin synthesis เมื่อต่อโหลดทางไฟฟ้า 5Ω | 87 |
| ภาพประกอบ 4-19 | ผลตอบสนองที่ได้จากระบบ Dahlin synthesis เมื่อต่อโหลดทางไฟฟ้า 10Ω | 88 |
| ภาพประกอบ 4-20 | ผลตอบสนองของความดันก๊าซเปรียบเทียบกับเวลาของระบบเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบ Dahlin synthesis โดยกำหนดค่าแรงดันเอาต์พุตเท่ากับ 7.67 V | 90 |
| ภาพประกอบ 4-21 | บล็อกไดอะแกรมของ Dahlin synthesis ทำงานควบคู่กับโหลดทางไฟฟ้าโดยตั้งค่าจำกัดความดันก๊าซที่ 10 psi | 90 |
| ภาพประกอบ 4-22 | ผลตอบสนองของ Dahlin synthesis ทำงานควบคู่กับโหลดทางไฟฟ้า โดยตั้งค่าจำกัดความดันก๊าซที่ 10 psi | 91 |
| ภาพประกอบ 4-23 | ผลตอบสนองของความดันก๊าซเปรียบเทียบกับเวลาของระบบเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบ Dahlin synthesis โดยกำหนดจำกัดความดันก๊าซที่ 10 psi | 91 |
| ภาพประกอบ 4-24 | บล็อกไดอะแกรมของ Dahlin synthesis โดยตั้งค่า Anti-windup ใน PID บล็อกไดอะแกรม | 92 |
| ภาพประกอบ 4-25 | การตั้งค่า Anti-windup ใน PID บล็อกไดอะแกรม | 93 |
| ภาพประกอบ 4-26 | ผลตอบสนองแรงดันไฟฟ้าของระบบที่มีการใช้ Anti-windup และระบบที่ไม่มีการใช้ Anti-windup โดยไม่ต่อโหลดทางไฟฟ้า | 94 |

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

| ภาพประกอบ | หน้า |
|---|-------------|
| ภาพประกอบ 4-27 ผลตอบสนองความดันก๊าซของระบบที่มีการใช้ Anti-windup และระบบที่ไม่มีการใช้ Anti-windup โดยไม่ต่อโหลดทางไฟฟ้า | 95 |
| ภาพประกอบ 4-28 บล็อกไดอะแกรมของระบบที่มีการใช้ Anti-windup และไม่มีการใช้ Anti-windup เมื่อต่อโหลดทางไฟฟ้า | 96 |
| ภาพประกอบ 4-29 ผลตอบสนองแรงดันไฟฟ้าของระบบที่มีการใช้ Anti-windup และ ไม่มีการใช้ Anti-windup เมื่อต่อโหลดทางไฟฟ้า 1 Ω | 96 |
| ภาพประกอบ 4-30 ผลตอบสนองแรงดันไฟฟ้าของระบบที่มีการใช้ Anti-windup และ ไม่มีการใช้ Anti-windup เมื่อต่อโหลดทางไฟฟ้า 2 Ω | 97 |
| ภาพประกอบ 4-31 ผลตอบสนองแรงดันไฟฟ้าของระบบที่มีการใช้ Anti-windup และ ไม่มีการใช้ Anti-windup เมื่อต่อโหลดทางไฟฟ้า 5 Ω | 97 |
| ภาพประกอบ 4-32 ผลตอบสนองแรงดันไฟฟ้าของระบบที่มีการใช้ Anti-windup และ ไม่มีการใช้ Anti-windup เมื่อต่อโหลดทางไฟฟ้า 10 Ω | 98 |
| ภาพประกอบ 4-33 ผลตอบสนองความดันก๊าซของระบบที่มีการใช้ Anti-windup และ ไม่มีการใช้ Anti-windup เมื่อต่อโหลดทางไฟฟ้า 1 Ω | 98 |
| ภาพประกอบ 4-34 ผลตอบสนองความดันก๊าซของระบบที่มีการใช้ Anti-windup และ ไม่มีการใช้ Anti-windup เมื่อต่อโหลดทางไฟฟ้า 2 Ω | 99 |
| ภาพประกอบ 4-35 ผลตอบสนองความดันก๊าซของระบบที่มีการใช้ Anti-windup และ ไม่มีการใช้ Anti-windup เมื่อต่อโหลดทางไฟฟ้า 5 Ω | 99 |
| ภาพประกอบ 4-36 ผลตอบสนองความดันก๊าซของระบบที่มีการใช้ Anti-windup และ ไม่มีการใช้ Anti-windup เมื่อต่อโหลดทางไฟฟ้า 10 Ω | 100 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเทอร์โมอิเล็กทริกเป็นที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในงานสำรวจและผลิตปิโตรเลียม เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเทอร์โมอิเล็กทริกทำงานโดยการแปลงพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยแหล่งพลังงานความร้อนคือก๊าซธรรมชาติที่ได้มาจากแหล่งผลิต เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเทอร์โมอิเล็กทริกมักถูกติดตั้งใช้งานที่แท่นผลิตปิโตรเลียม (Platform) เพื่อทำการกำเนิดและจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้กับอุปกรณ์การวัดและควบคุมต่างๆให้ทำงานได้อย่างปกติเมื่อไม่มีพนักงานระดับปฏิบัติการประจำการอยู่ การทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเทอร์โมอิเล็กทริก เริ่มจากการได้รับความดันก๊าซในระดับสูงเพื่อและทำการเผาไหม้อุปกรณ์ชนิดเทอร์โมอิเล็กทริกในห้องเผาไหม้ (Heat chamber) อุปกรณ์ชนิดนี้มีคุณสมบัติที่สามารถแปลงพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ และจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้กับอุปกรณ์การวัดและควบคุมต่างๆ เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเทอร์โมอิเล็กทริกหยุดทำงานจะไม่มีแรงดันเอาท์พุทนั้น หมายถึงไม่มีการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ เราสามารถวิเคราะห์และทำการตัดการจ่ายก๊าซได้จากการทำงานของระบบควบคุมปริมาณก๊าซที่เราทำการออกแบบ ในการทำงานนี้จะทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเทอร์โมอิเล็กทริกปลอดภัยจากการรั่วไหลของก๊าซธรรมชาติได้ อีกทั้งเรายังสามารถทำการควบคุมปริมาณก๊าซที่ไหลเข้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเทอร์โมอิเล็กทริกได้อย่างเหมาะสม

1.2 การตรวจเอกสาร บทความ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ที่ผ่านมาได้มีการคิดค้นแบบจำลองขึ้นมากมายเพื่อใช้ในการวิเคราะห์การทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเทอร์โมอิเล็กทริก โดยขึ้นอยู่กับรูปแบบของตัวจำลองที่นำมาสร้างระบบตัวจำลองที่นำมาใช้งานได้เช่น SPICE และ MATLAB Simulink นอกจากนี้การจำลองระบบยังคงมีข้อจำกัดบางอย่างในทุกแบบจำลองที่ไม่สามารถทำได้ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้รับการตีพิมพ์ดังตารางที่ 1-1 ประกอบไปด้วยการออกแบบตัวจำลอง 3 แบบด้วยกันคือ

แบบที่ 1: การวิเคราะห์อุณหภูมิทางด้านร้อนและเย็นของระบบที่ส่งผลต่อแรงดันเอาต์พุท

แบบที่ 2: การวิเคราะห์ผลกระทบของปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในตัววัสดุชนิดเทอร์โมอิเล็กทริกที่ส่งผลต่อแรงดันเอาต์พุท

แบบที่ 3: การวิเคราะห์พฤติกรรมของโหลดทางไฟฟ้าที่ส่งผลต่อแรงดันเอาต์พุท

1.2.1 วิเคราะห์อุณหภูมิทางด้านร้อนและเย็นของระบบส่งผลต่อแรงดันเอาต์พุท

การวิเคราะห์อุณหภูมิทางด้านร้อนและเย็นที่มีผลกระทบต่อระบบโดยรวมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเทอร์โมอิเล็กทริก นิยมนำมาใช้ในการสร้างตัวจำลองอย่างแพร่หลายเพราะที่อุณหภูมิที่แตกต่างกันทางด้านร้อนและเย็นเป็นตัวแปรสำคัญของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเอาต์พุทของระบบ ดังนั้นการศึกษา เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเทอร์โมอิเล็กทริกจำเป็นต้องพิจารณาอุณหภูมิร่วมด้วยทุกครั้งที่ทำกรวิเคราะห์

งานวิจัยของ A. Moser, L. Rendler, M. Kratschmer and P. Woias [1] ได้ทำการศึกษาวัสดุชนิดเทอร์โมอิเล็กทริกกับการระบายความร้อนของฮีทซิงค์ (Heat sink) โดยการเลือกใช้วัสดุชนิดเทอร์โมอิเล็กทริกที่แตกต่างกัน 4 วัสดุ ติดตั้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง โดยให้ด้านร้อนของวัสดุชนิดเทอร์โมอิเล็กทริก สัมผัสกับผนังห้องและด้านเย็นของวัสดุชนิดเทอร์โมอิเล็กทริก สัมผัสกับฮีทซิงค์ โดยมีเงื่อนไขคือเมื่อ วัสดุชนิดเทอร์โมอิเล็กทริกทำงานจนได้แรงดันเอาต์พุทสูงสุดตามที่ Datasheet ระบุไว้ จากนั้นทำการบันทึกเวลาที่ใช้ไปในการทดลอง ในการวิจัยนี้ทำให้ทราบประสิทธิภาพทางด้านความเร็วในการทำงานของวัสดุชนิดเทอร์โมอิเล็กทริกแต่ละชนิด

งานวิจัยของ M. Chen, L. A. Rosendahl, I. Bach, T. Condra and J. K. Pedersen [2] ได้ทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้โปรแกรม PSPICE สร้างแบบจำลองตามปรากฏการณ์ต่างๆที่เกิดขึ้นของวัสดุชนิดเทอร์โมอิเล็กทริกคือ ปรากฏการณ์ซีเบค (Seebeck effect) และปรากฏการณ์เพลทีเยอร์ (Peltier effect) เปรียบเทียบกับการทำงานของวัสดุชนิดเทอร์โมอิเล็กทริก HZ-20 โดยตั้งค่าเงื่อนไขการทำงานที่อุณหภูมิด้านร้อน 230 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิด้านเย็นที่ 30 องศาเซลเซียส จากนั้นทำการบันทึกค่าพลังงานเอาต์พุทของระบบ ในการวิจัยนี้ทำให้ทราบถึงผลกระทบจากปรากฏการณ์ต่างๆ กับพลังงานเอาต์พุทที่ได้ของวัสดุชนิดเทอร์โมอิเล็กทริก

1.2.2 วิเคราะห์ผลกระทบของปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก ที่ส่งผลกระทบต่อแรงดันเอาต์พุต

การวิเคราะห์ผลกระทบของปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่ส่งผลกระทบต่อแรงดันเอาต์พุต คือการวิเคราะห์ระบบ โดยรวมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเทอร์โมอิเล็กทริก โดยใช้ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องทั้งสามทฤษฎีเป็นตัวอ้างอิง โดยทั้งสามทฤษฎีคือ ทฤษฎีปรากฏการณ์ซีเบค (Seebeck effect) ทฤษฎีปรากฏการณ์เพลทีเยอร์ (Peltier effect) และทฤษฎีปรากฏการณ์ทอมสัน (Thomson effect) โดยทฤษฎีที่มีผลกระทบกับระบบโดยรวมมากที่สุดและนักวิจัยมักนำมาศึกษาค้นคว้าคือ ทฤษฎีปรากฏการณ์ซีเบค และทฤษฎีปรากฏการณ์เพลทีเยอร์ ส่วนทฤษฎีปรากฏการณ์ทอมสัน นักวิจัยมักจะละเลยไม่นำมาพิจารณาเพราะส่งผลกระทบต่อระบบน้อยมาก

งานวิจัยของ H. L. Tsai and J. M. Lin [3] ได้ทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวัสดุชนิดเทอร์โมอิเล็กทริกโดยใช้โปรแกรม MATLAB จากนั้นทดสอบระบบโดยรวมและทำการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น แรงดันเอาต์พุต พลังงานเอาต์พุต และประสิทธิภาพของระบบกับวัสดุชนิดเทอร์โมอิเล็กทริก HZ-20 การวิจัยนี้ทำให้ทราบว่าเราสามารถนำ MATLAB มาทำการสร้างแบบจำลองและได้ค่าประสิทธิภาพใกล้เคียงกับวัสดุของจริงและสามารถนำแบบจำลองมาต่อยอดในการทำงานได้

งานวิจัยของ M. Chen, L. Rosendahl, T. Condra and J. Pedersen [4] ได้ทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวัสดุชนิดเทอร์โมอิเล็กทริกโดยใช้โปรแกรม PSPICE โดยมีเงื่อนไขในการสร้าง คือมีการเปลี่ยนคุณสมบัติภายในตัววัสดุชนิดเทอร์โมอิเล็กทริก เมื่อวัสดุชนิดเทอร์โมอิเล็กทริกทำงานในสภาวะคงตัว (Steady state) โดยให้ค่าวัสดุที่เปลี่ยนแปลงเป็นไปตามฟังก์ชันของอุณหภูมิ ความร้อน และกระแสภายในตัวเทอร์โมอิเล็กทริก จากนั้นทำการบันทึกค่าพลังงานทางด้านเอาต์พุตที่ได้เปรียบเทียบกับวัสดุชนิดเทอร์โมอิเล็กทริก TEC1-12706 การวิจัยนี้ทำให้ทราบว่าฟังก์ชันและตัวแปรที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิของวัสดุชนิดเทอร์โมอิเล็กทริก ทำให้พลังงานเอาต์พุตที่ได้จากระบบเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย

1.2.3 วิเคราะห์พฤติกรรมของโหลดทางไฟฟ้าที่ส่งผลต่อแรงดันเอาต์พุต

การวิเคราะห์พฤติกรรมของโหลดทางไฟฟ้าที่ส่งผลต่อแรงดันเอาต์พุต คือการวิเคราะห์ระบบโดยรวมควบคู่กับการเปลี่ยนแปลงโหลดทางไฟฟ้าของระบบ แบ่งออกเป็นสองส่วน คือ การวิเคราะห์โหลดทางไฟฟ้าภายนอก และการวิเคราะห์โหลดทางไฟฟ้าภายใน ซึ่งการวิเคราะห์โหลดทางไฟฟ้าภายในส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของระบบน้อยเพราะ โหลดทางไฟฟ้ามีค่าน้อยมากเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าของโหลดทางไฟฟ้าโดยรวมของระบบ การเปลี่ยนแปลงโหลดทางไฟฟ้าภายนอกของระบบ จะส่งผลกระทบต่อแรงดันทางด้านเอาต์พุตอย่างมากในกรณีที่ค่าของโหลดทางไฟฟ้าภายนอกเปลี่ยนแปลงไปอย่างรวดเร็วเช่น เปลี่ยนแปลงจากค่าความต้านทานต่ำไปสูง จะทำให้แรงดันทางด้านเอาต์พุตเปลี่ยนแปลงไปอย่างรวดเร็วและส่งผลกระทบต่อระบบโดยรวม ดังนั้นในการออกแบบจึงจำเป็นต้องพิจารณาโหลดทางไฟฟ้าโดยรวมของระบบมีการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด จึงจะได้ระบบที่มีประสิทธิภาพ

งานวิจัยของ S. Kim [5] ได้ทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวัสดุชนิดเทอร์โมอิเล็กทริกโดยใช้โปรแกรม PSPICE โดยมีเงื่อนไขให้ระบบทำงานที่อุณหภูมิทางด้านร้อนและทางด้านเย็นแตกต่างกัน โดยตั้งค่าอุณหภูมิด้านร้อนโดยมากเท่ากับ 370 เคลวิน 350 เคลวิน และ 320 เคลวิน ตามลำดับ จากนั้นทำการบันทึกค่ากระแสและแรงดันเอาต์พุตเพื่อคำนวณความต้านทานรวมของระบบที่อุณหภูมิต่างๆ การวิจัยนี้ทำให้ทราบว่าความต้านทานรวมของระบบส่งผลให้กระแสและแรงดันเอาต์พุตเปลี่ยนแปลงได้เมื่ออุณหภูมิทางด้านร้อนและทางด้านเย็นเปลี่ยนแปลงไป

งานวิจัยของ M. Chen, L. A. Rosendahl, I. Bach, T. Condra and J. K. Pedersen [6] ได้ทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวัสดุชนิดเทอร์โมอิเล็กทริกโดยใช้โปรแกรม PSPICE โดยมีเงื่อนไขให้ระบบทำงานที่อุณหภูมิทางด้านร้อนและทางด้านเย็นแตกต่างกัน โดยอุณหภูมิทางด้านร้อนเท่ากับ 120 องศาเซลเซียส อุณหภูมิทางด้านเย็นเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส จากนั้นทำการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานทางด้านเอาต์พุตจากค่ามากที่สุดมายังค่าที่น้อยสุดอย่างรวดเร็วและบันทึกค่าแรงดันเอาต์พุต การวิจัยนี้ทำให้ทราบว่าเมื่อเราเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานทางด้านเอาต์พุตอย่างรวดเร็วหรือเปลี่ยนแปลงก่อนที่วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกจะเข้าสู่การทำงานในสภาวะคงตัว จะทำให้ได้ค่าแรงดันเอาต์พุตลดลงอย่างรวดเร็ว

นอกจากนี้งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการค้นคว้าวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกได้ถูกนำพิจารณาอย่างต่อเนื่องโดยมีวัตถุประสงค์เดียวกันคือ ค้นคว้าวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่ให้ผลตอบแทนแรงดันและกำลังไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตให้มีค่าสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณแหล่งพลังงานความร้อนที่สูญเสียไปในกระบวนการผลิต

ดังนั้นงานวิจัยนี้จะเป็นการวิเคราะห์ความแตกต่างของอุณหภูมิ โดยใช้ทฤษฎีปรากฏการณ์ซีเบค และทฤษฎีปรากฏการณ์เพลทีเยอร์ และการเลือกใช้โหลดทางไฟฟ้าโดยรวมให้แบบจำลองมีประสิทธิภาพสูงสุด และการออกแบบตัวจำลองโดยใช้ MATLAB ซึ่งถือเป็นงานวิจัยที่ยังไม่มีการนำเสนอมาก่อน

ตาราง 1-1 การวิเคราะห์หลักการของบทความเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเทอร์โมอิเล็กทริก

| Researchers | Title/Conclusion | Advantage | Effects/ Model |
|---|---|---|-------------------------------------|
| A. Moser, L. Rendler, M. Kratschmer and P. Woias, 2008 [1] | Transient model for thermoelectric generator system harvesting from the natural ambient temperature cycle ได้ทำการทดสอบระบบที่อุณหภูมิโดยรอบ TEG และบันทึกผลอุณหภูมิของ Heat sink | ทำให้ทราบถึงประสิทธิภาพของตัวระบายความร้อนที่มีผลต่อระบบ | Seebeck,Peltier/TEG module |
| M. Chen, L. A. Rosendahl, I. Bach, T. Condra and J. K. Pedersen, 2007 [2] | Multi-physics simulation of thermoelectric generator through numerically modeling ได้ทำการศึกษาผลกระทบที่มีต่อระบบ เมื่ออุณหภูมิทางด้านร้อนและด้านเย็นเปลี่ยนแปลง | ทำให้ทราบถึงประสิทธิภาพของวัสดุชนิดเทอร์โมอิเล็กทริก เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ | Seebeck, Peltier /SPICE, TEG module |

ตาราง 1-1 การวิเคราะห์หลักการของบทความเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเทอร์โมอิเล็กทริก (ต่อ)

| Researchers | Title/Conclusion | Advantage | Effects/ Model |
|--|--|---|---|
| H. L. Tsai, J. M. Lin , 2009 [3] | Model Building and Simulation of Thermoelectric Module ได้ทำการสร้างแบบจำลองของ TEG ให้ได้ผลตาม Datasheet | ได้ศึกษาแบบจำลองวัสดุชนิดเทอร์โมอิเล็กทริก | Seebeck, Peltier/ MATLAB Simulink |
| M. Chen, L. A. Rosendahl, T. Condra and J. K. Pedersen, 2009 [4] | Numerical Modeling of Thermoelectric Generators With Varing Material Properties in a Circuit Simulator ได้ทำการสร้างแบบจำลองของ TEG ให้ได้ผลตาม Datasheet | ได้ศึกษาแบบจำลองวัสดุชนิดเทอร์โมอิเล็กทริก | Seebeck, Peltier/ SPICE |
| S. Kim, 2013 [5] | Analysis and modeling of effective temperature ได้ทำการศึกษาผลกระทบที่มีต่อระบบเมื่อโหลดและอุณหภูมิทางด้านร้อนมีการเปลี่ยนแปลง | ทราบถึงประสิทธิภาพของวัสดุชนิดเทอร์โมอิเล็กทริก เมื่อโหลดและอุณหภูมิทางด้านร้อนมีการเปลี่ยนแปลง | Seebeck, Peltier /TEG module |
| M. Chen, L. A. Rosendahl, T. Condra and J. K. Pedersen, 2006 [6] | Transient Behavior study of Thermoelectric generators through an electro-thermal model using SPICE ได้ทำการศึกษาผลกระทบที่มีต่อระบบเมื่อโหลดและอุณหภูมิทางด้านร้อนเปลี่ยนแปลง | ทำให้ทราบถึงประสิทธิภาพของวัสดุชนิดเทอร์โมอิเล็กทริก เมื่อโหลดเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ | Seebeck, Peltier /SPICE, TEG module |

ตาราง 1-1 การวิเคราะห์หลักการของบทความเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเทอร์โมอิเล็กทริก (ต่อ)

| Researchers | Title/Conclusion | Advantage | Effects/ Model |
|--|---|---|----------------------------|
| Y-Y. Hsiao, W. C. Chang and S. L. Chen, 2010 [7] | A Mathematic model of Thermoelectric module with applications on waste heat recovery from automobile engine ได้ทำการสร้างแบบจำลองของ TEG และบันทึกพลังงานทางด้านเอาท์พุท เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิทางด้านร้อน | ทำให้ทราบผลตอบสนองของ TEG เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว | Seebeck / TEG module |
| S. Lineykin and S. Ben-Yaakov, 2004 [8] | Spice compatible equivalent circuit of the energy conversion process in thermoelectric modules ได้ทำการสร้างแบบจำลองทางไฟฟ้าของ TEG เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของโมดูล | ทราบผลของปรากฏการณ์ซีเบคและปรากฏการณ์เพลเทียร์ที่มีต่อระบบ และสามารถนำแบบจำลองไปใช้งานได้ | Seebeck, Peltier/ SPICE |
| J.P.Carmo, J. Antunes, M. F. Silva, J. F. Riibeiro, L. M. Goncalves and J.H. Correia, 2011 [9] | Characterization of thermoelectric generators by measuring the load-dependence behavior ได้ทำการวัดแรงดันเอาท์พุท เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลด | ทำให้ทราบถึงประสิทธิภาพของวัสดุชนิดเทอร์โมอิเล็กทริก เมื่อโหลดเปลี่ยนแปลง | Seebeck / TEG module |

ตาราง 1-1 การวิเคราะห์หลักการของบทความเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเทอร์โมอิเล็กทริก (ต่อ)

| Researchers | Title/Conclusion | Advantage | Effects/ Model |
|--|--|--|--|
| M. Freunek, M. Muller, T. Ungan, W. Walker and L. M. Reindl, 2009 [10] | New Physical Model for Thermoelectric generators ได้ทำการศึกษาทุกปรากฏการณ์ที่มีผลต่อ TEG | ทำให้ทราบถึงประสิทธิภาพของวัสดุชนิดเทอร์โมอิเล็กทริกเมื่อมีการศึกษาทุกๆ ผลกระทบของระบบ | Seebeck, Peltier, Thomson / TEG module |
| B. I. Ismail and W. H. Ahmed, 2008 [11] | Thermoelectric power generation using waste-heat energy as an alternative green technology ได้ทำการสร้าง TEG โดยใช้พลังงานสะอาดที่เหลือทิ้งแล้ว | ได้ศึกษาการออกแบบเครื่องจักร TEG | Seebeck, Peltier /TEG module |
| P. E. Gray, 1960 [12] | The effect of source and sink thermal resistance on thermoelectric generator ได้ทำการศึกษาผลกระทบที่มีต่อระบบเมื่ออุณหภูมิทางด้านร้อนและเย็นเปลี่ยนแปลง | ทำให้ทราบถึงประสิทธิภาพของวัสดุชนิดเทอร์โมอิเล็กทริกเมื่อเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ | Seebeck, Peltier /SPICE, TEG module |
| JA. Chávez, 2000 [13] | Spice model of thermoelectric elements including thermal effects ได้ทำการศึกษาผลกระทบที่มีต่อระบบเมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิทางด้านร้อนและเย็น | ทำให้ทราบถึงประสิทธิภาพของวัสดุชนิดเทอร์โมอิเล็กทริกเมื่อเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ | Seebeck, Peltier /SPICE, TEG module |

ตาราง 1-1 การวิเคราะห์หลักการของบทความเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเทอร์โมอิเล็กทริก (ต่อ)

| Researchers | Title/Conclusion | Advantage | Effects/ Model |
|---|---|--|-------------------------------------|
| M. Chen, L. A. Rosendahl, T. Condra and J. K. Pedersen, 2011 [14] | Design Methodology of Large-Scale Thermoelectric Generation: A Hierarchical Modeling Approach ได้ทำการศึกษาระบบโดยรวมเมื่อใช้อุณหภูมิสูงในการใช้งาน | ทำให้ทราบถึงประสิทธิภาพของวัสดุชนิดเทอร์โมอิเล็กทริกที่อุณหภูมิสูง | Seebeck, Peltier /SPICE, TEG module |
| S. Lineykin, S. Ben-Yaakov, 2005 [15] | Modeling and analysis of Thermoelectric modules ได้ทำการศึกษาและสร้างแบบจำลองของ TEG ให้ได้ผลตาม Data sheet | ได้ศึกษาแบบจำลองวัสดุชนิดเทอร์โมอิเล็กทริก | Seebeck, Peltier/ SPICE |
| T. M. Corry and G. Spira, 1962 [16] | Thermoelectric generator design, performance and Application ได้ทำการศึกษาการเลือกใช้วัสดุชนิดเทอร์โมอิเล็กทริก | ทำให้ทราบถึงประสิทธิภาพของวัสดุชนิดเทอร์โมอิเล็กทริกแต่ละชนิด | Seebeck, Peltier/ SPICE |
| P. G. Lau, R. J. Buist, 1997 [17] | Calculation of thermoelectric power generation performance using finite element analysis ได้ทำการศึกษาและคำนวณค่าประสิทธิภาพของ TEG ที่อุณหภูมิต่างกัน | ทำให้ทราบถึงประสิทธิภาพของวัสดุชนิดเทอร์โมอิเล็กทริก | Seebeck, Peltier /SPICE, TEG module |

ตาราง 1-1 การวิเคราะห์หลักการของบทความเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเทอร์โมอิเล็กทริก (ต่อ)

| Researchers | Title/Conclusion | Advantage | Effects/ Model |
|--|---|---|-------------------------------------|
| S. Lineykin and S. Ben-Yaakov, 2005 [18] | Analysis of thermoelectric coolers by a SPICE-compatible equivalent circuit model ได้ทำการศึกษาผลกระทบที่มีต่อระบบเมื่ออุณหภูมิทางด้านร้อนและเย็นเปลี่ยนแปลง | ทำให้ทราบถึงประสิทธิภาพของวัสดุชนิดเทอร์โมอิเล็กทริก เมื่อเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ | Seebeck, Peltier /SPICE, TEG module |
| J. Chen and Z. Yan, 1996 [19] | The influence of Thomson effect on the maximum power output and maximum efficiency of thermoelectric generator ได้ทำการศึกษา Thomson effect ที่มีผลต่อระบบ | ทำให้ทราบถึงประสิทธิภาพของวัสดุชนิดเทอร์โมอิเล็กทริก เมื่อพิจารณา Thomson effect ร่วมกับ Seebeck effect | Seebeck, Thomson/ SPICE |
| I. Laird, D. C. Lu, 2011 [20] | SPICE steady state modeling of thermoelectric generators involving the Thomson effect ได้ทำการศึกษา Thomson effect ที่มีผลต่อระบบ | ทำให้ทราบถึงประสิทธิภาพของวัสดุชนิดเทอร์โมอิเล็กทริก เมื่อพิจารณา Thomson effect ร่วมกับ Seebeck effect | Seebeck, Thomson/ SPICE |
| R. J. Buist and P. G. Lau, 1997 [21] | Thermoelectric generator design and selection from TE Cooling module specifications ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของ TEG ที่อุณหภูมิที่ต่างกัน | ทำให้ทราบถึงประสิทธิภาพของวัสดุชนิดเทอร์โมอิเล็กทริก เมื่อเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ | Seebeck, Peltier /SPICE, TEG module |

1.3 วัตถุประสงค์

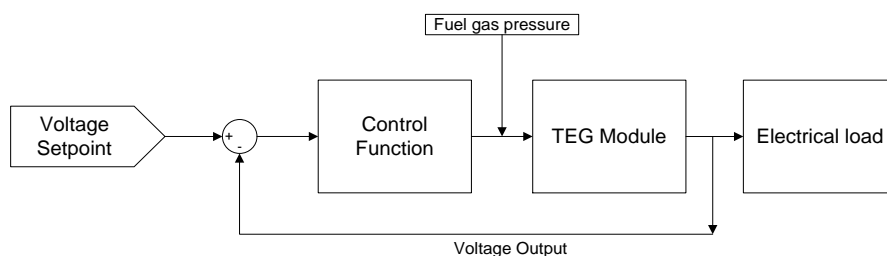
1. สร้างแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเทอร์โมอิเล็กทริก
2. สร้างแบบจำลองของระบบควบคุมอุณหภูมิโดยการปรับความดันก๊าซของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเทอร์โมอิเล็กทริก
3. ศึกษาประสิทธิภาพของระบบควบคุมอุณหภูมิโดยการปรับความดันก๊าซของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเทอร์โมอิเล็กทริก

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1. ออกแบบและสร้างแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเทอร์โมอิเล็กทริกโดยใช้ระบบควบคุมความดันก๊าซ
2. กำหนดอุณหภูมิทางด้านร้อนและอุณหภูมิทางด้านเย็นมีค่าคงที่เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเทอร์โมอิเล็กทริกทำงานในภาวะคงที่
3. กำหนดแรงดันเอาต์พุตให้มีค่าคงที่เท่ากับแรงดันเอาต์พุตสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเทอร์โมอิเล็กทริกที่ได้มาจากการทดลอง
4. ใช้โปรแกรม MATLAB ในการสร้างแบบจำลองระบบควบคุมความดันก๊าซและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเทอร์โมอิเล็กทริก
5. แบบจำลองระบบควบคุมความดันก๊าซ และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเทอร์โมอิเล็กทริกที่สร้างขึ้นมีค่าผิดพลาดของแรงดันเปรียบเทียบกับระบบจริงไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์

1.5 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงานวิจัย

เราทำการศึกษาแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเทอร์โมอิเล็กทริกและทำการออกแบบแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเทอร์โมอิเล็กทริกโดยจำลองการทำงานของระบบโดยรวมลงบนโปรแกรม MATLAB ตามภาพประกอบ 1-1 เพื่อจำลองการควบคุมความดันก๊าซในปริมาณที่เหมาะสมเพื่อให้ได้อุณหภูมิทางด้านขาเข้าให้มีความสอดคล้องกับแรงดันทางด้านเอาต์พุตและกำหนดให้มีอัตราการเพิ่มขึ้นและลดลงของความดันก๊าซในด้านประสิทธิภาพ คือมีแรงดันทางด้านเอาต์พุตที่คงที่และจำลองโหลดทางไฟฟ้า จากนั้นบันทึกผลที่ได้และสรุปผลประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเทอร์โมอิเล็กทริก



ภาพประกอบ 1-1 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเทอร์โมอิเล็กทริก
โดยใช้ตัวจำลอง MATLAB

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. แบบจำลองได้ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเทอร์โมอิเล็กทริก ที่ใช้ในการสอนวิชา TEG
2. แบบจำลองที่สามารถใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาระบบควบคุมอุณหภูมิโดยการปรับความดันก๊าซ
3. เป็นแนวทางในการพัฒนาระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเทอร์โมอิเล็กทริก

1.7 ทรัพยากรที่ใช้ในการพัฒนาระบบ

ในการวิจัยนี้เป็นการพัฒนาระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเทอร์โมอิเล็กทริกซอฟต์แวร์และอุปกรณ์ที่ใช้ในการออกแบบและทดสอบดังนี้

- เครื่องคอมพิวเตอร์
- แบบจำลองระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเทอร์โมอิเล็กทริก (TEG simulation model)
- โปรแกรม MATLAB

1.8 แผนการดำเนินการวิจัย

ตาราง 1-2 แผนการดำเนินการวิจัย

| แผนการดำเนินงานวิทยานิพนธ์ | ปีการศึกษา 2556 | | | | | | | | ปีการศึกษา 2557 | | | | | | | |
|------------------------------------|-----------------|---|---|---|---------------|---|---|---|-----------------|---|---|---|---------------|---|---|---|
| | ภาคเรียนที่ 1 | | | | ภาคเรียนที่ 2 | | | | ภาคเรียนที่ 1 | | | | ภาคเรียนที่ 2 | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1.ศึกษาบทความงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | ■ | ■ | ■ | | | | | | | | | | | | | |
| 2.ศึกษาโครงสร้างและหลักการทํางาน | | ■ | ■ | ■ | | | | | | | | | | | | |
| 3.สอบโครงร่างวิทยานิพนธ์ | | | | ■ | | | | | | | | | | | | |
| 4.ศึกษาและออกแบบตัวจำลองระบบ | | | | | ■ | ■ | ■ | ■ | | | | | | | | |
| 5.ทดสอบตัวจำลองระบบ | | | | | | | | | ■ | ■ | | | | | | |
| 6.ค้นหาและปรับปรุงข้อผิดพลาด | | | | | | | | | ■ | ■ | | | | | | |
| 7.จัดทำรายงานวิทยานิพนธ์ | | | | | | | | | | | ■ | ■ | ■ | ■ | | |
| 8.สอบป้องกันวิทยานิพนธ์ | | | | | | | | | | | | | | | ■ | ■ |

บทที่ 2

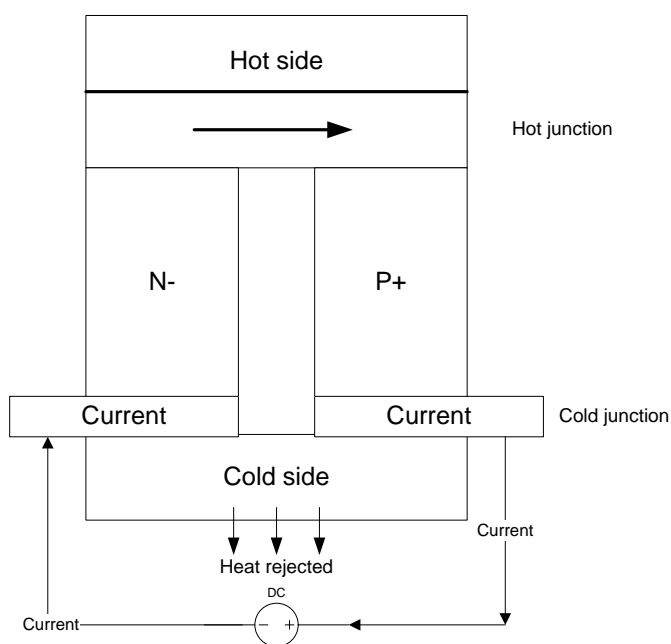
ทฤษฎีและหลักการ

2.1 ความหมายของเทอร์โมอิเล็กทริก

เทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric) เป็นคำที่เกิดจากการผสมกันระหว่างคำว่า เทอร์โม (Thermo) ซึ่งมีความหมายว่าความร้อน และอิเล็กทริก (Electric) ซึ่งมีความหมายว่าไฟฟ้า ดังนั้นจึงเป็นปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับความร้อนและไฟฟ้า กล่าวคือปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริก เป็นการเปลี่ยนความร้อนให้เป็นกระแสไฟฟ้าได้โดยตรง และในทางสลับกันก็สามารถเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าให้เป็นความเย็นได้โดยตรง โดยผ่านวัสดุตัวกลางที่มีสมบัติของเทอร์โมอิเล็กทริกเรียกว่าวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric materials) โดยกระบวนการเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าและความเย็นจะอาศัยหลักการสั้นสะเทือนของโครงสร้างภายในวัสดุเชิงฟิสิกส์ควอนตัม เมื่อวัสดุ เทอร์โมอิเล็กทริกได้รับอุณหภูมิที่แตกต่างกันระหว่างปลายทั้งสองข้าง พบว่าจะมีการถ่ายเทอุณหภูมิจากอุณหภูมิสูงไปยังอุณหภูมิต่ำ นั่นคือมีการสั้นของอนุภาคโฟนอน (Phonon) และการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน (Electron) จะได้พลังงานไฟฟ้าออกมา ในทางตรงข้าม เมื่อวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกมีความต่างศักย์ไฟฟ้าจะมีการถ่ายเทประจุไฟฟ้าจากความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงไปยังความต่างศักย์ไฟฟ้าต่ำจะได้ความเย็นออกมา เป็นไปตามหลักการของเพลเทียร์ ปรากฏการณ์ของวัสดุชนิดเทอร์โมอิเล็กทริกมี 3 ปรากฏการณ์คือ ปรากฏการณ์ซีเบค (Seebeck effect) ปรากฏการณ์เพลเทียร์ (Peltier effect) และปรากฏการณ์ทอมสัน (Thomson effect) ความสัมพันธ์ระหว่างปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริกทั้ง 3 ปรากฏการณ์นี้มีรากฐานเกี่ยวกับการเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าหรือเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานความร้อนหรือเย็น ดังจะกล่าวในรายละเอียดของแต่ละปรากฏการณ์ดังนี้ [22]

2.2 ปปรากฏการณ์ซีเบก

โทมัส โจแฮนน์ ซีเบก (Thomas Johann Seebeck) กล่าวว่า “เมื่อให้ความร้อนที่รอยต่อของตัวนำ 2 ชนิดจะเกิดกระแสไฟฟ้าไหลในวงจรปิด” [22]



ภาพประกอบ 2-1 ความต่างศักย์ซีเบกและการไหลของกระแสไฟฟ้า

ปรากฏการณ์ซีเบกมีรากฐานเกี่ยวกับการเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้า ความสำคัญทางกายภาพ เมื่อทำการให้ความร้อนที่รอยต่อของโลหะต่างชนิดกัน 2 ชนิด จะทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างปลายโลหะทั้งสองด้าน เนื่องจากอิเล็กตรอนที่ปลายโลหะด้านร้อนมีพลังงานจลน์สูงกว่าปลายโลหะด้านเย็นและเคลื่อนที่เร็วกว่า จึงทำให้เกิดความแตกต่างของปริมาณอิเล็กตรอนที่ปลายโลหะทั้งสองดังกล่าว การเกิดขึ้นของประจุทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้ากลับ (Back electromotive force) ซึ่งตรงข้ามกับการไหลของประจุ ความต่างศักย์วงจรถัดเมื่อไม่มีกระแสไหลเกิดขึ้น เรียกว่า ความต่างศักย์ซีเบก (Seebeck voltage)

สำหรับสมการของปรากฏการณ์ซีเบก ถ้าเขียนในรูปของผลต่างของความต่างศักย์ไฟฟ้าและผลต่างอุณหภูมิจะได้ว่า

(31)

$$\frac{dV}{dx} = S \frac{dT}{dx} \quad (2.1)$$

$$\Delta V = S \Delta T \quad (2.2)$$

สมการ 2.1 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสนามไฟฟ้าและอุณหภูมิเกรเดียนต์ได้
ดังนี้ คือ

$$E = S \nabla T \quad (2.3)$$

เมื่อ ΔV คือ ผลต่างความต่างศักย์ไฟฟ้า (V)

E คือ สนามไฟฟ้า ($V m^{-1}$)

S คือ สัมประสิทธิ์ซีเบก ($V K^{-1}$)

ΔT คือ ผลต่างอุณหภูมิ (K)

∇T คือ อุณหภูมิเกรเดียนต์ (K/m)

วัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบก (Seebeck coefficient) ไม่เท่ากับศูนย์ จะเป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก และจะมีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบกได้ทั้งบวกและลบขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุนั้นๆ เช่น ในกรณีของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-type) จะมีสัมประสิทธิ์ซีเบกเป็นลบ แต่สารกึ่งตัวนำชนิดพี (P-type) จะมีสัมประสิทธิ์ซีเบกเป็นบวก [22]

2.3 ปรากฏการณ์เพลเทียร์

นีน เพลเทียร์ ซาร์เลส ธาเนส (Jean Charles Athanase Peltier) กล่าวว่า “เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหล จะมีความร้อนเกิดขึ้นที่รอยต่อของตัวนำ ความร้อนจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงขึ้นอยู่กับทิศการไหลของกระแสไฟฟ้า” [22]

ปรากฏการณ์เพลเทียร์เป็นปรากฏการณ์ซึ่งคู่กันกับปรากฏการณ์ซีเบก และถูกนำมาใช้ประโยชน์ในการทำระบบหล่อเย็นจากการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน (Thermoelectric refrigeration) ในที่นี้อัตราของการดูดซับความร้อนแบบกลับได้ (Rate of reversible heat absorption, Q) ซึ่งส่งมาพร้อมกับการผ่านกระแสไฟฟ้า (Current, I) ผ่านรอยต่อ คือ

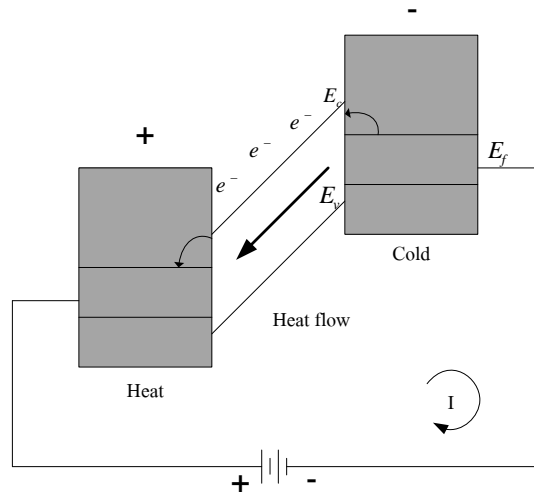
$$Q = (\Pi_a - \Pi_b)I = \Pi_{ab}I \quad (2.4)$$

$$\Pi_{ab} = ST \quad (2.5)$$

- เมื่อ S คือ สัมประสิทธิ์ซีเบก (V/K^{-1})
 T คือ อุณหภูมิเทอร์โมไดนามิก (K)
 Π_{ab} คือ สัมประสิทธิ์เพลเทียร์ (W/K^{-1})
 Q คือ อัตราของการดูดซับความร้อนแบบกลับได้ (J)
 I คือ กระแสไฟฟ้า (A)

$\Pi_{ab} < 0$; ค่าสัมประสิทธิ์เพลเทียร์เป็นลบ

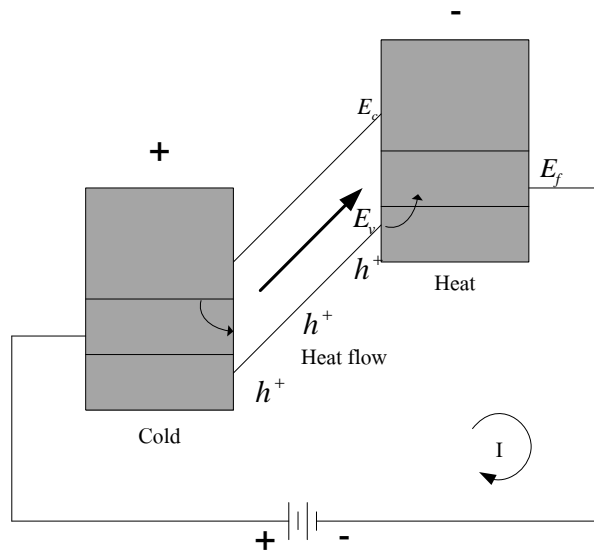
อิเล็กทรอนิกส์ของอะตอมพลังงานสูงเคลื่อนย้ายจากขั้วมาซ้าย การไหลเวียนความร้อนและกระแสไฟฟ้ามักมีทิศทางตรงกันข้ามกัน ดังภาพประกอบ 2-2



ภาพประกอบ 2-2 การไหลเวียนของความร้อนและกระแสไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ
กรณีค่าสัมประสิทธิ์เพลเทียร์เป็นลบ

$\Pi_{ab} > 0$; ค่าสัมประสิทธิ์เพลเทียร์เป็นบวก

อิเล็กตรอนของอะตอมหลุมพลังงานสูงเคลื่อนย้ายจากซ้ายมาขวา การไหลเวียน
ความร้อนและกระแสไฟฟ้ามีทิศทางเดียวกัน ดังภาพประกอบ 2-3 [22]

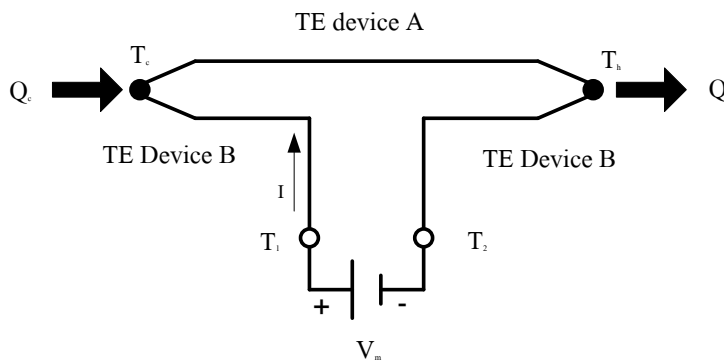


ภาพประกอบ 2-3 การไหลเวียนของความร้อนและกระแสไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ
กรณีค่าสัมประสิทธิ์เพลเทียร์เป็นบวก

2.4 ปรากฏการณ์ทอมสัน

วิลเลียม ทอมสัน (William Thomson) หรือลอร์ด เคลวิน (Lord Kelvin) กล่าวว่า “เมื่อมีกระแสไฟฟ้าผ่านตัวนำไฟฟ้า 2 จุด ที่มีอุณหภูมิแตกต่างกัน ทิศทางความร้อนขึ้นอยู่กับกรไหลของกระแสไฟฟ้าจากจุดเย็นไปจุดร้อน หรือจากจุดร้อนไปจุดเย็น” [22]

ปรากฏการณ์ทอมสันเกี่ยวข้องกับอัตราการแพร่ของความร้อนแบบกลับตามสมการค่าความนำความร้อน $\Delta Q = Q_h - Q_c$ ซึ่งเกิดขึ้นมากเนื่องจากการผ่านกระแสไฟฟ้าตามตัวนำเดี่ยวอันหนึ่ง เมื่อมีอุณหภูมิเกรเดียนต์ $\Delta T = T_h - T_c$ ดังภาพประกอบ 2-4



ภาพประกอบ 2-4 วงจรเทอร์โมไดนามิกของปรากฏการณ์ทอมสัน

โดยมีสมการความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์ทอมสัน (K) ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบก (S) และค่าสัมประสิทธิ์เพลเทียร์ (Π_{ab}) ดังนี้

$$K = \frac{d\Pi}{dT} S \tag{2.6}$$

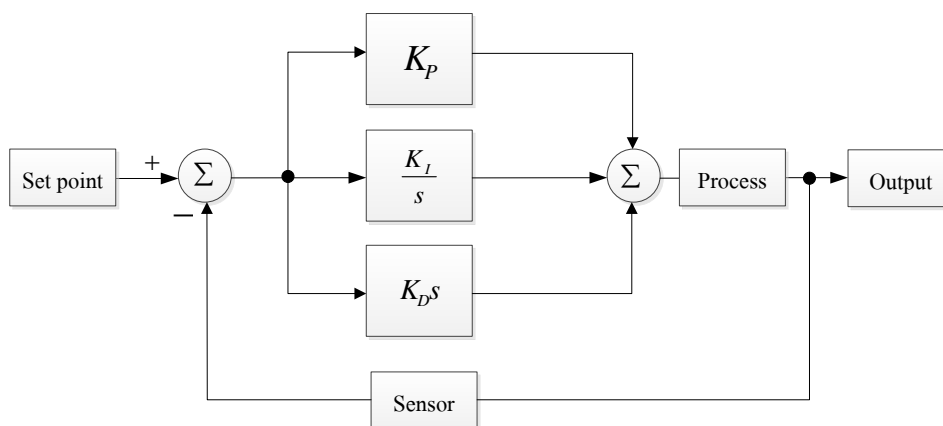
$$K = T \frac{dS}{dT} \tag{2.7}$$

- เมื่อ K คือ สัมประสิทธิ์ทอมสัน (K/psi)
- T คือ อุณหภูมิเทอร์โมไดนามิก (K)

2.5 ตัวควบคุมแบบ PID controller

ตัวควบคุมแบบ PID เป็นหนึ่งในตัวควบคุมที่ถูกใช้มากที่สุด ทั้งในกระบวนการทางอุตสาหกรรม และในการทดลองด้วยโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนของตัวควบคุมแบบ PID การปรับอัตราการขยาย (Gain) ของตัวควบคุมก็ทำได้ง่ายและรวดเร็ว โดยยังให้ผลตอบสนองที่ยอมรับได้ ระบบควบคุมแบบ PID มีตัวควบคุมย่อย 3 ตัวคือ ตัวควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional, P-controller) ตัวควบคุมแบบปริพันธ์ (Integral, I-controller) และ ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ (Derivative, D-controller) ในการควบคุมระบบทั่วไปมักใช้งานตัวควบคุมร่วมกัน เช่น ตัวควบคุมแบบ PI ตัวควบคุมแบบ PD และตัวควบคุมแบบ PID เพื่อให้เกิดผลดีต่อระบบควบคุม [23]

ลักษณะการทำงานของตัวควบคุมแบบ PID ก็คือการทำงานร่วมกันของตัวควบคุมแบบสัดส่วนหรือตัวควบคุมแบบ P ตัวควบคุมแบบปริพันธ์หรือตัวควบคุมแบบ I และตัวควบคุมแบบอนุพันธ์หรือตัวควบคุมแบบ D ในส่วนของแผนผังโครงสร้างของตัวควบคุมแบบ PID แสดงได้ดังภาพประกอบ 2-5



ภาพประกอบ 2-5 แผนผังโครงสร้างตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับแบบปริพันธ์ และแบบอนุพันธ์ (PID controller)

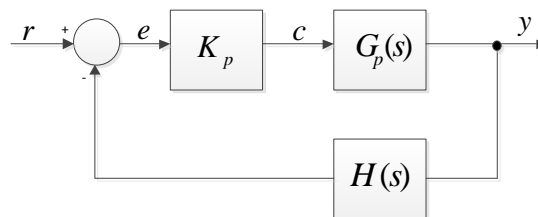
จากแผนผังโครงสร้างตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับแบบปริพันธ์และแบบอนุพันธ์สามารถเขียนรูปแบบสมการได้ดังนี้

$$c(t) = K_p e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (2.8)$$

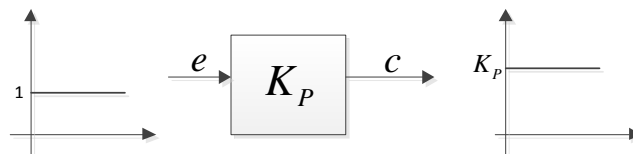
โดยลักษณะของตัวควบคุมแต่ละแบบมีรายละเอียดการทำงานของตัวควบคุมดังนี้

2.5.1 ตัวควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional controller)

ตัวควบคุมแบบสัดส่วนหรือตัวควบคุมแบบ P ตัวควบคุมแบบนี้จะนำเอาสัญญาณค่าความผิดพลาดระหว่างสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณเอาต์พุตมาเป็นอินพุตของตัวควบคุม แล้วตัวควบคุมจะทำการสร้างสัญญาณเอาต์พุตด้วยการขยายสัญญาณความผิดพลาดดังกล่าว ด้วยค่าอัตราการขยาย ของตัวควบคุม K_p บล็อกไดอะแกรมและลักษณะของการประมวลผลสัญญาณเป็นดังภาพประกอบ 2-6 และ 2-7 จุดเด่นของตัวควบคุมแบบนี้เมื่อนำไปใช้งานก็คือ การปรับค่าอัตราการขยายให้สูงขึ้นจะมีผลทำให้ระบบมีผลตอบสนองที่เร็วขึ้น [23]



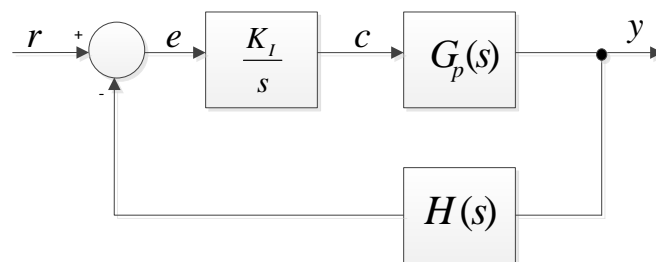
ภาพประกอบ 2-6 บล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุมแบบสัดส่วน



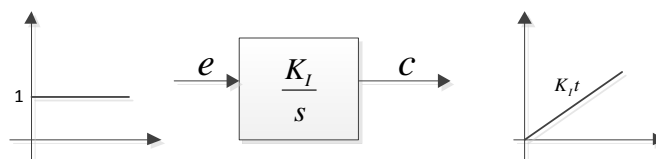
ภาพประกอบ 2-7 ลักษณะของการประมวลผลสัญญาณของตัวควบคุมแบบสัดส่วน

2.5.2 ตัวควบคุมแบบปริพันธ์ (Integral controller)

ตัวควบคุมแบบปริพันธ์หรือตัวควบคุมแบบ I ตัวควบคุมแบบนี้จะนำเอาสัญญาณความผิดพลาดระหว่างสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณเอาต์พุตมาเป็นอินพุตของตัวควบคุม แล้วตัวควบคุมจะทำการสร้างสัญญาณเอาต์พุตด้วยการอินทิเกรตสัญญาณความผิดพลาดดังกล่าว แล้วคูณด้วยค่าอัตราขยายของตัวควบคุม K_I บล็อกไดอะแกรมและลักษณะของการประมวลผลสัญญาณเป็นดังภาพประกอบ 2-8 และ 2-9 จุดเด่นของตัวควบคุมแบบนี้เมื่อนำไปใช้งานก็คือ ถ้านำไปใช้กับระบบชนิด 0 (System type 0) ตัวควบคุมแบบนี้จะสามารถขจัดค่าความผิดพลาดในสภาวะคงตัวได้ ข้อด้อยที่จะเกิดขึ้นในการนำไปใช้งานก็คือ ตัวควบคุมนี้ไม่สามารถลดผลของการพุ่งเกินของผลตอบสนองได้ และการปรับอัตราขยายให้มีค่าสูงอาจจะทำให้ได้ผลตอบสนองที่ไม่เป็นที่พึงประสงค์ได้ อาจกล่าวได้ว่าเมื่อทำการปรับอัตราขยายให้สูงขึ้นผลตอบสนองของระบบอาจเกิดการแกว่งได้ [23]



ภาพประกอบ 2-8 บล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุมแบบปริพันธ์



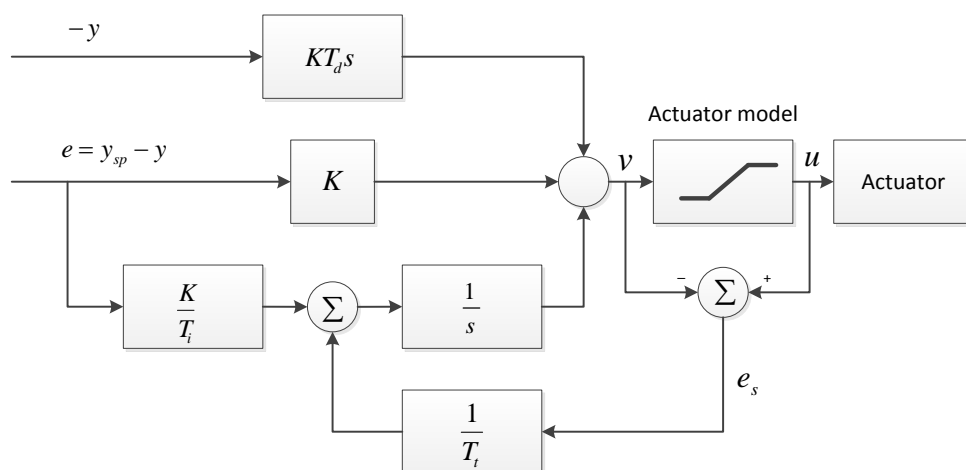
ภาพประกอบ 2-9 ลักษณะของการประมวลผลสัญญาณของตัวควบคุมแบบปริพันธ์

การควบคุมแบบอินทิกรัล มีลักษณะเช่นเดียวกับการควบคุมสัดส่วนตรง ผลกระทบของการเพิ่มอัตราขยายของตัวควบคุม หากอัตราขยายมีค่ามากเกินไปจะทำให้ผลตอบสนองของระบบมีการแกว่ง โดยทั่วไป Integral time ($T_i = 1/K_I$ sec โดยที่ $K_I = \text{repeats/sec}$) เป็นตัวแสดงว่า อัตราการตอบสนองของกระบวนการต่อสัญญาณการควบคุม ค่า T_i ที่น้อยกว่า จะทำให้ตัว

ควบคุมมีการตอบสนองที่เร็วกว่าในระยะเริ่มต้น โดยที่ความคลาดเคลื่อนยังเป็นค่าบวกอยู่ ดังนั้น ค่าความคลาดเคลื่อนจะเป็นศูนย์ เทอมไบแอสก็จะมีค่าสูงกว่าที่ต้องการ ดังนั้นผลตอบสนองจึงเกิดส่วนพุ่งเกิน (Overshoot) สูงกว่าค่ากำหนด เป็นผลให้ตัวอินทิกรัลทำหน้าที่ปรับให้ความคลาดเคลื่อนมีค่าลดลง การใช้ตัวอินทิกรัลในการควบคุม ควรระวังในเรื่องของความคลาดเคลื่อนขนาดใหญ่ (เช่น เกิดการเปลี่ยนแปลงค่ากำหนดขนาดใหญ่) เพราะจะทำให้เกิดปัญหา Integral windup ถึงแม้ว่า T_i มีค่าถูกต้องในสภาวะการทำงานธรรมดา แต่สัญญาณควบคุมอาจถึง จุดอิ่มตัวขณะผลตอบเกิดส่วนพุ่งเกิน ในการป้องกันการเกิด Integral windup เราใช้วิธีการ Anti-windup ในตัวควบคุมอินทิกรัลเมื่อ Actuator มีการอิ่มตัวจากการอินทิเกรตค่า Error ขนาดใหญ่เกิดขึ้น

2.5.2.1 หลักการ Anti-windup

Anti-windup คือ การแก้ปัญหาค่าพุ่งเกินสูงกว่าค่ากำหนดที่เกิดจากการอิ่มตัวจากการอินทิเกรตค่า Error ขนาดใหญ่เกิดขึ้นในตัวควบคุมอินทิกรัล มีวิธีการในการแก้ไขปัญหานี้หลายวิธีด้วยกันแต่วิธีที่นิยมและที่จะกล่าวถึงคือ วิธีการ Tracking ดังแสดงตามภาพประกอบ 2-10 โดยมีเส้นทางของ Feedback เพิ่มขึ้นมาจากปกติ สัญญาณ e_s คือ สัญญาณความแตกต่างระหว่างเอาต์พุตของตัวควบคุมปกติ v กับ เอาต์พุตของตัวควบคุม Saturation u [23]

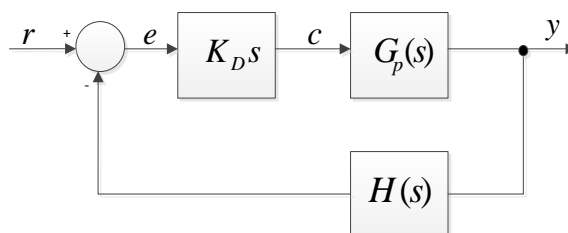


ภาพประกอบ 2-10 บล็อกไดอะแกรมของ Anti-windup tracking point

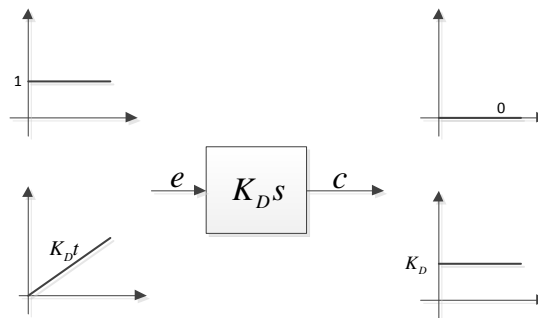
สัญญาณ e_s ป้อนกลับเพื่อให้เป็นตัวอินพุทของอินทิเกรเตอร์โดยผ่านอัตราขยาย $1/T_t$ สัญญาณ e_s จะมีค่าเป็นศูนย์เมื่อไม่มีค่า Saturation เกิดขึ้น ภายใต้สถานการณ์นี้จะไม่มีผลกระทบใดๆต่ออินทิเกรเตอร์ และเมื่อ Actuator เกิดการอิ่มตัว จะเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าจากศูนย์ของสัญญาณ e_s มันพยายามผลักดันให้ค่าเอาต์พุทของตัวอินทิเกรเตอร์ ซึ่งก็คือค่าเอาต์พุทของตัวควบคุมปกติ v มีค่าใกล้เคียงกับค่า Saturation limit มากที่สุด การ Tracking ที่เกิดขึ้นคือการรีเซ็ตค่าอินทิกรัลในตัว Controller โดยเวลาที่ใช้จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับตัวแปร T_t หรือ Tracking time constant

2.5.3 ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ (Derivative controller)

ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์หรือตัวควบคุมแบบ D ตัวควบคุมแบบนี้จะนำเอาสัญญาณความผิดพลาดระหว่างสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณเอาต์พุตมาเป็นอินพุทของตัวควบคุม แล้วตัวควบคุมจะทำการสร้างสัญญาณเอาต์พุตด้วยการอนุพันธ์สัญญาณความผิดพลาดดังกล่าว แล้วคูณด้วยค่าอัตราขยายของตัวควบคุม K_D บล็อกไดอะแกรมและลักษณะของการประมวลผลสัญญาณเป็นดังภาพประกอบ 2-11 และ 2-12 จุดเด่นของตัวควบคุมแบบนี้เมื่อนำไปใช้งานก็คือ ตัวควบคุมแบบนี้ใช้สำหรับลดผลของการพุ่งเกินของผลตอบสนองได้ ลดผลตอบสนองที่มีการเปลี่ยนแปลงไปมาได้ แต่ต้องปรับค่าอัตราขยายให้เหมาะสมด้วย ไม่เช่นนั้นอาจจะทำให้ได้ผลตอบสนองที่ไม่เป็นที่พึงประสงค์ ปัญหาที่อาจจะเกิดขึ้นในการนำเอาตัวควบคุมนี้ไปใช้งานก็คือ ตัวควบคุมแบบนี้จะไม่สามารถจำกัดค่าความผิดพลาดในสภาวะคงตัวได้ และการใช้ตัวควบคุมนี้อาจจะทำให้ได้ผลตอบสนองที่ช้าลงได้ [23]



ภาพประกอบ 2-11 บล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุมแบบอนุพันธ์



ภาพประกอบ 2-12 ลักษณะของการประมวลผลสัญญาณของตัวควบคุมแบบอนุพันธ์

2.6 กระบวนการแบบอันดับหนึ่ง

การวิเคราะห์ระบบในงานควบคุม ส่วนใหญ่พิจารณากระบวนการแบบอันดับหนึ่ง มีสมการอนุพันธ์อันดับที่หนึ่ง (1st order differential equation) ที่ใช้อธิบายคุณลักษณะ คือ

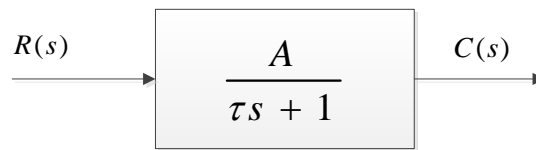
$$\frac{dc(t)}{dt} + c(t) = Ar(t) \quad (2.9)$$

ค่าพารามิเตอร์ของระบบอันดับหนึ่งมีสองค่า คือ

1. ค่าคงตัวเวลา τ (Time constant) เป็นค่าที่กำหนดความเร็วในการตอบสนองของระบบอันดับหนึ่งมีหน่วยเป็นวินาที (Sec)
2. ค่าอัตราขยาย A เป็นค่าที่บอกถึงค่าสุดท้าย (Final value) ของผลตอบสนองของระบบ ต่อสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันได ฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function) ของระบบที่แสดงคุณลักษณะด้วยสมการอนุพันธ์อันดับที่หนึ่งดังนี้คือ

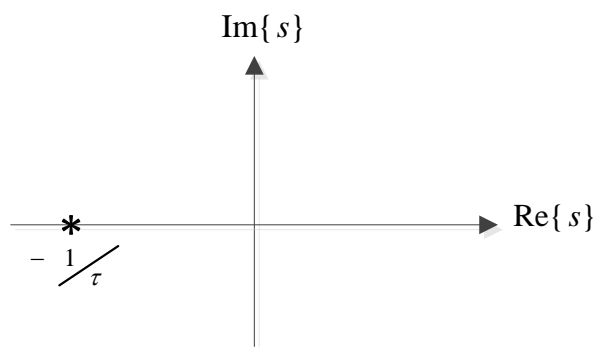
$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{A/\tau}{s + 1/\tau} \quad (2.10)$$

หรือแสดงในภาพประกอบของแผนภาพบล็อกได้ดังนี้



ภาพประกอบ 2-13 แผนภาพบล็อกของระบบอันดับหนึ่ง

ระบบนี้มีโพลเพียงโพลเดียว อยู่ที่ตำแหน่ง $s = -1/\tau$



ภาพประกอบ 2-14 ตำแหน่งของโพลบน s-plane ของระบบอันดับหนึ่ง

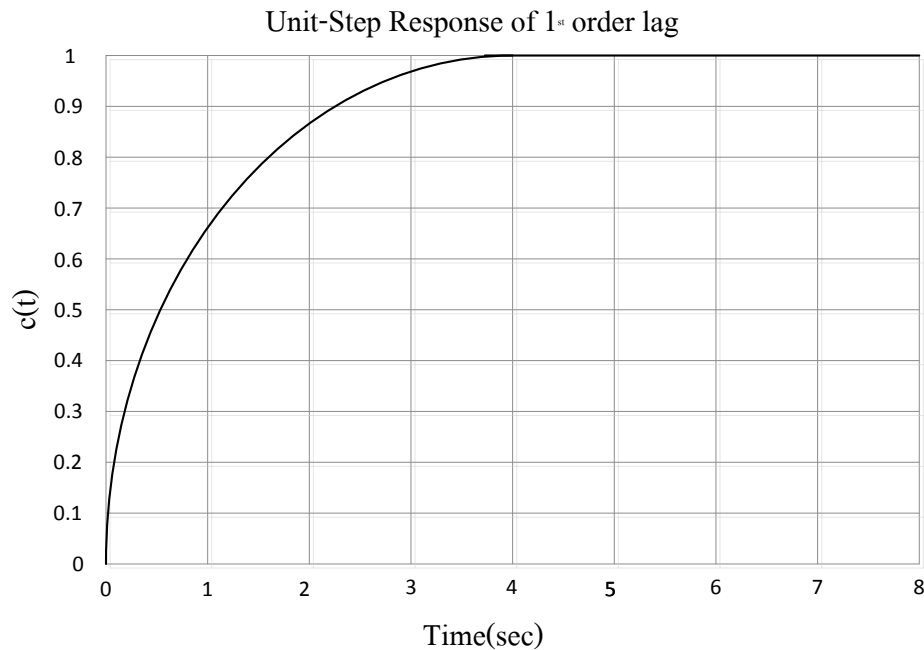
เมื่อให้สัญญาณอินพุต $r(t)$ เป็นสัญญาณแบบขั้นบันได หรือ $R(s) = \frac{1}{s}$ และหาสัญญาณเอาต์พุต $C(s)$ ได้เป็น

$$C(s) = R(s)G(s) = \frac{A/\tau}{s(s + \frac{1}{\tau})} = \frac{A}{s} - \frac{A}{s + \frac{1}{\tau}} \quad (2.11)$$

ทำการแปลงลาปลาซผกผัน (Inverse Laplace transform) สมการที่ 2.10 ได้ผลตอบสนองต่อสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันไดของกระบวนการแบบอันดับหนึ่งเท่ากับ

$$C(s) = A(1 - e^{-t/\tau})u(t) \quad (2.12)$$

เมื่อทำการวาดผลตอบสนองต่อสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันไดของกระบวนการแบบอันดับหนึ่งในสมการที่ 2.11 โดยให้ค่า $A=1$ และ $\tau=1$ และคำนวณค่า $C(t)$ จะได้กราฟดังภาพประกอบ 2-15



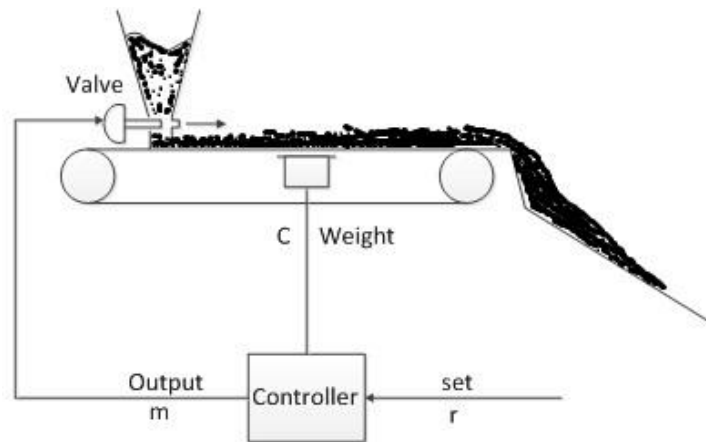
ภาพประกอบ 2-15 แสดงผลตอบสนองเชิงเวลาของ 1st order lag

2.7 เวลาไร้การตอบสนอง (Dead time)

เวลาไร้การตอบสนอง (Dead time) เป็นคุณสมบัติทางกายภาพของระบบ ซึ่งผลตอบสนองของมันต่ออินพุตจะถูกหน่วง (Delay) ไป กล่าวคือ เวลาไร้การตอบสนองเป็นช่วงเวลาหลังจากที่มีการใส่อินพุตเข้าไปในระบบแล้วแต่ยังไม่มีผลตอบสนองที่สามารถสังเกตเห็นได้ คุณสมบัตินี้ไม่ขึ้นอยู่กับธรรมชาติของอินพุต คือไม่ว่าอย่างไรเวลาไร้การตอบสนองก็จะมีผลปรากฏอยู่เสมอ

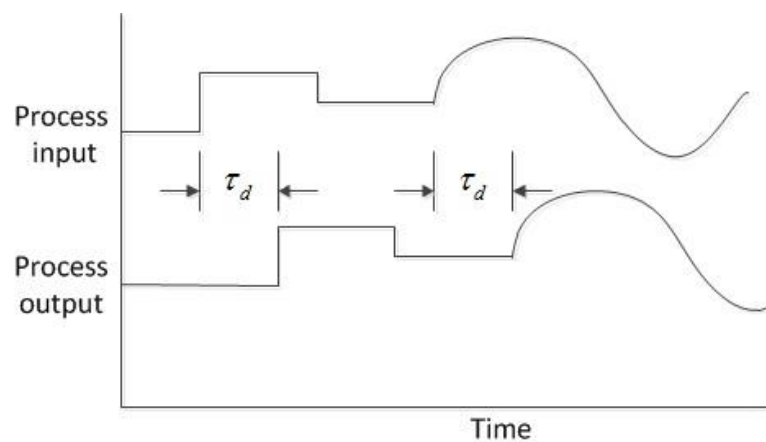
เวลาไร้การตอบสนองจะเกิดขึ้นในระบบที่มีการขนส่งมวลหรือพลังงาน ความยาวของระยะทางและความเร็วในการเคลื่อนที่เหล่านี้ทำให้เกิดการหน่วงเกิดขึ้น ในบางครั้งเราเรียกเวลาไร้การตอบสนองว่า Pure delay, Transport lag, Distance-velocity lag โดยที่คุณสมบัติของมันเหมือนองค์ประกอบพื้นฐานอื่นๆ คือจะไม่เกิดขึ้นเพียงลำพังในกระบวนการจริง

ตัวอย่างของกระบวนการที่มีเวลาไร้การตอบสนองเพียงอย่างเดียวคือ กระบวนการควบคุมน้ำหนักที่ถูกขนส่งด้วยสายพาน (Conveyor) แสดงในภาพประกอบ 2-15 จะเห็นว่าเวลาไร้การตอบสนองจะเกิดขึ้นระหว่าง Action ของวาล์ว (Valve) กับผลการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักที่เกิดขึ้น ซึ่งก็คือ ระยะทางระหว่างของวาล์วและเซลล์ (Cell) วัดด้วยความเร็วของสายพาน (ฟุต/นาที) เวลาไร้การตอบสนองเป็นปัญหาของการขนส่งที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ จากการที่มีเวลาไร้การตอบสนองนี้ เราจึงต้องมีเทคนิคในการออกแบบระบบควบคุมของเราให้สามารถปฏิบัติการอยู่ได้ เมื่อมีผลของเวลาไร้การตอบสนอง [24]



ภาพประกอบ 2-16 ปัญหาของการขนส่งเนื่องจากเวลาไร้การตอบสนอง

ผลตอบสนองของเวลาไร้การตอบสนองต่อสัญญาณใดๆก็ตาม จะเป็นไปในทำนองเดียวกันคือ สัญญาณนั้นจะถูกหน่วงไปด้วยขนาดของเวลาไร้การตอบสนอง แสดงในภาพประกอบ 2-17



ภาพประกอบ 2-17 เวลาไร้การตอบสนองเนื่องจากเวลาไร้การตอบสนอง

จะเห็นได้ว่าผลตอบสนองเวลาไร้การตอบสนองต่ออินพุตแบบไซน์ (Sine) จะมีค่าการหน่วงเกิดขึ้นซึ่งก่อให้เกิดมูมเลื่อน (Phase shift) ระหว่างอินพุตและเอาต์พุต เนื่องจากคุณสมบัติของรูปแบบป้อนกลับจะมีแนวโน้มเข้าสู่การแกว่ง ดังนั้นคุณสมบัติของมูมเลื่อนจึงเป็นสิ่งสำคัญที่ควรพิจารณา

กระบวนการควบคุมแบบป้อนกลับเป็น Action ที่ใช้เพื่อแก้ไขค่าอินพุตที่เข้าสู่กระบวนการให้ถูกต้อง ซึ่งมีพื้นฐานค่าเอาต์พุตปัจจุบันของมัน ในกรณีนี้ Action ของการปรับแก้ถูกดำเนินการจากการสังเกตผลกระทบที่เกิดขึ้นในกระบวนการที่มีเวลาไร้การตอบสนอง ซึ่งจะทำให้ไม่สามารถสังเกตผลกระทบที่เกิดขึ้นในทันทีทันใดได้ ดังนั้น Action ของการควบคุมจะต้องสามารถหลีกเลี่ยงผลของการหน่วงได้ เวลาไร้การตอบสนองจึงเป็นที่รู้จักกันดีว่าเป็นองค์ประกอบทางไดนามิกที่ควบคุมได้ยากที่สุดซึ่งจะเกิดขึ้นในระบบที่มีคุณสมบัติทางกายภาพ โดยเฉพาะ ยิ่งถ้าระบบไม่มีการควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบอัตโนมัติ (Automatic controller) [24]

2.8 กระบวนการอันดับหนึ่งที่มีเวลาไร้การตอบสนอง (FOPDT)

กระบวนการอันดับหนึ่งซึ่งมีเวลาไร้การตอบสนอง (First Order Plus Dead Time: FOPDT) มีรูปแบบที่ง่ายที่สุดของฟังก์ชันถ่ายโอนที่ใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการซึ่งอยู่ในรูปแบบหนึ่งที่นิยมใช้กันมากที่สุด ดังสมการ

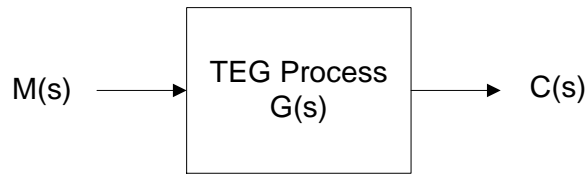
$$G(s) = \frac{Ke^{-t_0s}}{\tau s + 1} \quad (2.13)$$

เมื่อ K คือ อัตราขยายของกระบวนการ (Process gain)

t_0 คือ ค่าเวลาไร้การตอบสนองของกระบวนการ (Process dead time)

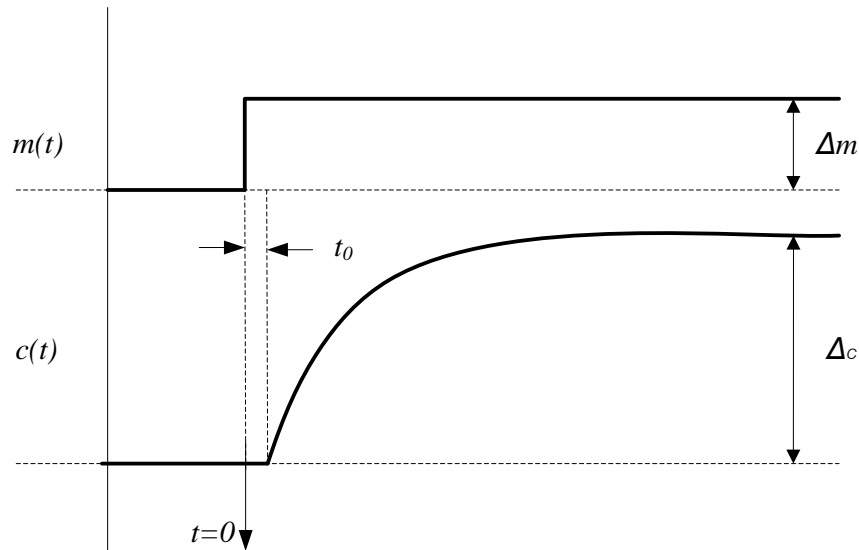
τ คือ ค่าหน่วงเวลาคงที่ของกระบวนการ (Process time constant)

จากสมการ 2.13 พบว่าตัวแปรของกระบวนการทั้ง 3 ตัวแปร สามารถหาค่าได้จากการทดสอบกระบวนการโดยการทดสอบแบบวงเปิด (Open loop) เนื่องจากเป็นการทดสอบเฉพาะกระบวนการเท่านั้นและไม่พิจารณาสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น โดยทำการป้อนสัญญาณขั้นบันได $M(s)$ ดังภาพประกอบ 2-18



ภาพประกอบ 2-18 บล็อกไดอะแกรมของการทดสอบแบบวงเปิดโดยการป้อนสัญญาณขั้นบันได

ผลตอบสนองของกระบวนการจะมีลักษณะดังภาพประกอบ 2-19 ดังนั้นการทดสอบนี้สามารถกระทำกับกระบวนการอันดับสองหรือกระบวนการอันดับสูงที่มีอัตราหน่วง (Damping ratio) มากกว่าหรือเท่ากับหนึ่งได้ด้วยเช่นกัน



ภาพประกอบ 2-19 ผลตอบสนองของกระบวนการแบบวงเปิดต่อสัญญาณขั้นบันได

เมื่อไม่พิจารณาสัญญาณรบกวนขณะทำการทดสอบ ฟังก์ชันถ่ายโอนของสัญญาณเอาต์พุตซึ่งเป็นผลตอบสนองของกระบวนการ แสดงได้เป็น

$$C(s) = G(s)M(s) \quad (2.14)$$

จากสมการที่ 2.14 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงขนาดของสัญญาณควบคุม Δm จะได้สมการลาปลาซของกระบวนการคือ

(46)

$$G(s) = \frac{Ke^{-t_0s}}{\tau s + 1} \times \frac{\Delta m}{s} \quad (2.15)$$

$$G(s) = K\Delta m e^{-t_0s} \left[\frac{1}{s} - \frac{\tau}{\tau s + 1} \right] \quad (2.16)$$

จากสมการที่ 2.15 เมื่อทำการแปลงลาปลาซแบบผกผันได้

$$\Delta c(t) = K\Delta m u(t - t_0) \left[1 - e^{-\frac{t-t_0}{\tau}} \right] \quad (2.17)$$

จากสมการที่ 2.16 จะพบว่า $\Delta c(t) = 0$ เมื่อ $t \leq t_0$ เนื่องจากฟังก์ชันขั้นบันได $u(t - t_0)$ ส่วนพจน์ของ Δc แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณเอาที่พุดที่เวลาใดๆเทียบกับค่าสถานะเริ่มต้น คือ

$$\Delta c(t) = c(t) - c(0) \quad (2.18)$$

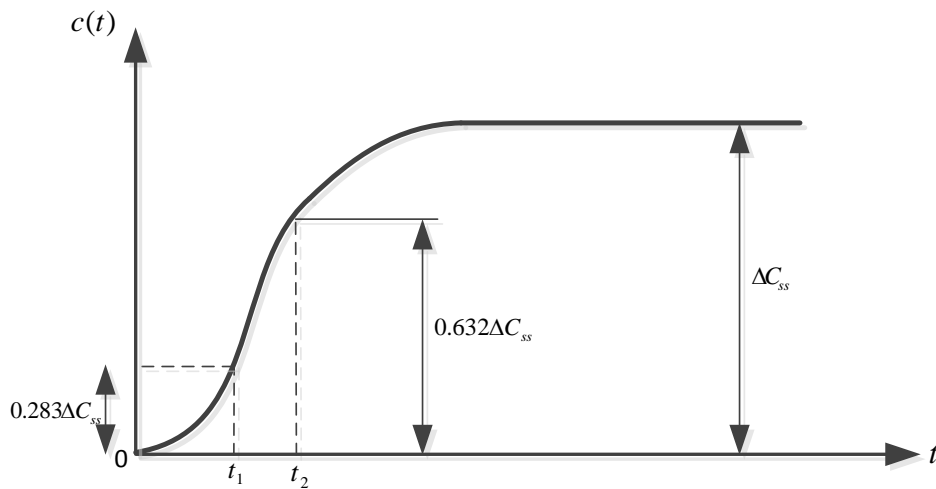
ที่สถานะคงที่ $\Delta c(t)$ จะแทนด้วย Δc_{ss} ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$\Delta c_{ss} = \lim_{t \rightarrow \infty} \Delta c(t) = K\Delta m \quad (2.19)$$

จากสมการที่ 2.18 ค่าคุณลักษณะของกระบวนการตัวแรกที่สามารถหาได้คือ อัตราขยายซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$K = \frac{\Delta c_{ss}}{\Delta m} \quad (2.20)$$

ค่าเวลาไว้การตอบสนองของกระบวนการ ได้จากการจับเวลาตั้งแต่ค่าเริ่มต้นจนกระทั่งกระบวนการเริ่มมีการตอบสนองประมาณ 3% จากค่าเริ่มต้น ส่วนค่าเวลาคงที่จะได้จากการคำนวณ ดังแสดงในภาพประกอบ 2-20



ภาพประกอบ 2-20 การพิจารณาค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการแบบ FOPDT

กำหนดให้ $t_1 = t_0 + \frac{\tau}{3}$ และ $t_2 = t_0 + \tau$ แทนค่าลงในสมการ 2.16 ได้

$$\Delta c(t_0 + \frac{\tau}{3}) = K\Delta m \left[1 - e^{-\frac{1}{3}} \right] = 0.283K\Delta m = 0.283\Delta c_{ss} \quad (2.21)$$

$$\Delta c(t_0 + \tau) = K\Delta m [1 - e^{-1}] = 0.632K\Delta m = 0.632\Delta c_{ss} \quad (2.22)$$

หรืออาจกล่าวได้ว่า t_1 คือเวลาที่ $\Delta c = 0.283\Delta c_{ss}$

t_2 คือเวลาที่ $\Delta c = 0.632\Delta c_{ss}$

จากสมการที่ 2.21 จะได้

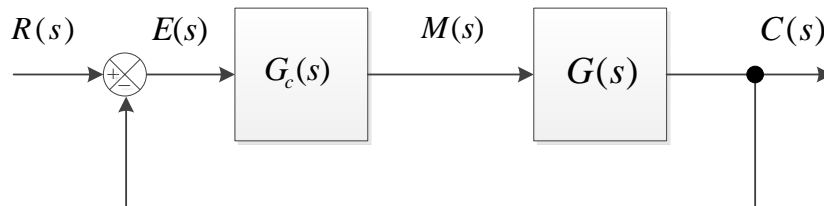
$$\tau = \frac{3}{2}(t_2 - t_1) \quad \text{และ} \quad t_0 = t_2 - \tau$$

(2.23)

ค่าพารามิเตอร์ทั้ง 3 ค่านี้จะถูกนำไปใช้ในการสังเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ที่เหมาะสมในแต่ละกระบวนการต่อไป [25]

2.9 การสังเคราะห์พารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ด้วยวิธีการของดาห์ลิน (Dahlin)

การสังเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID นั้นจะพิจารณาจากหลักการควบคุมแบบวงปิด (Closed-loop) โดยไม่พิจารณาสัญญาณรบกวน ดังแสดงในภาพประกอบ 2-21



ภาพประกอบ 2-21 บล็อกไดอะแกรมของการสังเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID

จากภาพประกอบ 2.21 พิจารณาฟังก์ชันถ่ายโอนแบบวงปิด ได้เท่ากับ

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G_c(s)G(s)}{1 + G_c(s)G(s)} \quad (2.24)$$

จากสมการที่ 2.24 ได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุม เท่ากับ

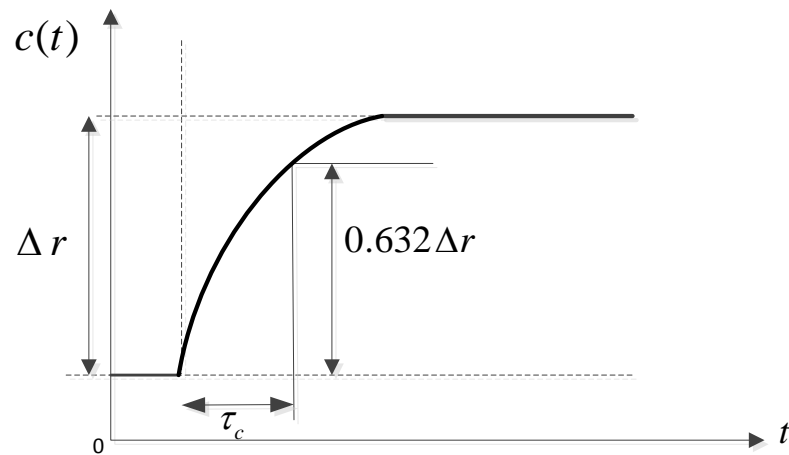
$$G_c(s) = \frac{1}{G(s)} \times \frac{C(s)/R(s)}{1 - [C(s)/R(s)]} \quad (2.25)$$

ผลการตอบสนองแบบวงปิดในรูปแบบที่ง่ายที่สุดคือผลตอบสนองแบบอันดับหนึ่ง (First order lag) ที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนโดยคือ

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{1}{\tau_c s + 1} \quad (2.26)$$

เมื่อ τ_c คือ ค่าเวลาคงที่ของผลตอบสนองแบบวงปิด (วินาที)

ค่าพารามิเตอร์ τ_c สามารถปรับค่าได้ ซึ่งหาก τ_c มีค่าน้อยจะทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ได้เร็วขึ้น ดังแสดงในภาพประกอบ 2-22



ภาพประกอบ 2-22 ผลตอบสนองแบบวงปิดในรูปแบบอันดับหนึ่ง

แทนค่าสมการที่ 2.26 ลงในสมการที่ 2.25 ได้

$$G_c(s) = \frac{t}{G(s)} \times \frac{\frac{1}{\tau_c s + 1}}{1 - \left[\frac{1}{\tau_c s + 1} \right]} = \frac{1}{G(s)} \times \frac{1}{\tau_c s + 1 - 1} \quad (2.27)$$

$$G_c(s) = \frac{1}{G(s)} \times \frac{1}{\tau_c s} \quad (2.28)$$

จากสมการที่ 2.28 จะพบว่าตัวควบคุมมีการทำงานในแบบอินทิกรัลซึ่งเป็นผลมาจากฟังก์ชันถ่ายโอนของอัตราขยายแบบวงปิดในสมการ 2.26 จึงทำให้ผลตอบสนองของกระบวนการไม่เกิดค่าออฟเซต

แทนค่าสมการที่ 2.13 ลงในสมการที่ 2.28 ได้

$$G_c(s) = \frac{\tau s + 1}{K e^{-t_0 s}} \times \frac{1}{\tau_c s} \quad (2.29)$$

$$G_c(s) = \frac{\tau}{K\tau_c} \left[1 + \frac{1}{\tau s} \right] e^{t_0 s} \quad (2.30)$$

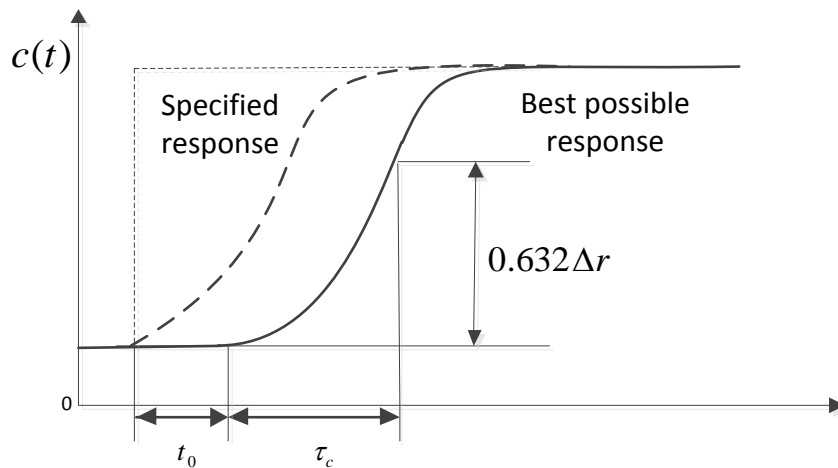
จากสมการที่ 2.30 ฟังก์ชันถ่ายโอนมีค่าเวลาไ้การตอบสนองเป็นลบจึงทำให้ตัวควบคุมชนิดนี้ไม่เป็นจริง ดังนั้นจึงต้องพิจารณาผลตอบสนองแบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาไ้การตอบสนองเท่ากับ t_0 ดังแสดงในภาพประกอบ 2-23 ซึ่งมีฟังก์ชันถ่ายโอนเท่ากับ

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{e^{-t_0 s}}{\tau_c s + 1} \quad (2.31)$$

แทนสมการที่ 2.31 ลงในสมการที่ 2.25 ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมจึงเท่ากับ

$$G_c(s) = \frac{\tau s + 1}{K e^{-t_0 s}} \times \frac{e^{-t_0 s}}{\tau_c s + 1 - e^{-t_0 s}} \quad (2.32)$$

$$G_c(s) = \frac{\tau s + 1}{K} \times \frac{1}{\tau_c s + 1 - e^{-t_0 s}} \quad (2.33)$$



ภาพประกอบ 2-23 ผลตอบสนองแบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาไ้การตอบสนองเท่ากับ t_0

ถึงแม้ว่าตัวควบคุมชนิดนี้มีความเป็นไปได้ในทางทฤษฎี แต่อย่างไรก็ตามการทำให้เกิดผลในทางปฏิบัตินั้นเป็นไปได้ยาก สาเหตุที่สำคัญที่สุดคือตัวควบคุม PID แบบดั้งเดิมนั้นมีการทำงานในแบบแอนะล็อก และพจน์ $e^{-t_0 s}$ ไม่สามารถทำให้เกิดผลได้จริงในทางปฏิบัติด้วย

อุปกรณ์ทางแอนะล็อก แต่ตัวควบคุม PID ในปัจจุบันประกอบขึ้นด้วยไมโครโปรเซสเซอร์และดิจิทัลคอมพิวเตอร์จึงทำให้พจน์ของเวลาไร้การตอบสนองเกิดผลได้จริง ซึ่งเมื่อมีการทำงานในพจน์นี้ จะเรียกว่าพจน์ตัวทำนาย (Predictor) หรือพจน์การชดเชยเวลาไร้การตอบสนอง (Dead-time compensation)

จากสมการที่ 2.32 ประมาณค่าพจน์เอกซ์โพเนนเชียลด้วยอนุกรมเทย์เลอร์ (Taylor series expansion)

$$e^{-t_0s} = 1 - t_0s + \frac{1}{2!}(t_0s)^2 - \frac{1}{3!}(t_0s)^3 + \dots \quad (2.34)$$

ประมาณค่าโดยใช้ 2 พจน์แรก คือ

$$e^{-t_0s} \approx 1 - t_0s \quad (2.35)$$

การประมาณค่าอนุกรมเทย์เลอร์ด้วยอนุพันธ์อันดับหนึ่งเพื่อหลีกเลี่ยงเวลาไร้การตอบสนองที่เกิดขึ้น ซึ่งเวลาไร้การตอบสนองมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับความเร็วในการตอบสนองของวงปิด หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าตัวควบคุม PI ที่ไม่มีการชดเชยเวลาไร้การตอบสนองเป็นการประมาณที่ดีในการสังเคราะห์ตัวควบคุมตลอดช่วงเวลาไร้การตอบสนองของกระบวนการ ซึ่งมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับค่าเวลาคงที่ของกระบวนการ

แทนที่ค่าสมการที่ 2.35 ลงใน 2.33 ได้

$$G_c(s) = \frac{\tau + 1}{K} \times \frac{1}{(\tau_c s + t_0)s} \quad (2.36)$$

$$G_c(s) = \frac{\tau}{K(\tau_c s + t_0)} \left(1 + \frac{1}{\tau} \right) \quad (2.37)$$

ซึ่งก็คือตัวควบคุม PI ที่มีค่า

$$K_p = \frac{\tau}{K(\tau_c + t_0)} \quad \text{และ} \quad T_i = \tau \quad (2.38)$$

เมื่อทำการสังเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID แบบวงปิด ของคาห์ลินได้ค่าพารามิเตอร์

$$K_p = \frac{\tau}{K(\tau_c + t_0)}, \quad T_i = \tau \text{ และ } T_d = \frac{t_0}{2} \quad (2.39)$$

กระบวนการที่ใช้การควบคุมแบบ PID ควรมีค่า มากกว่า และ ควรเท่ากับ ในการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมาย เพื่อให้เกิดค่าพุ่งเกิน (Overshoot) ไม่เกิน 5% ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้ ดังนั้น

$$K_p = \frac{\tau}{K(\tau_c + t_0)} = \frac{0.5}{K} \left(\frac{\tau}{t_0} \right) \quad (2.40)$$

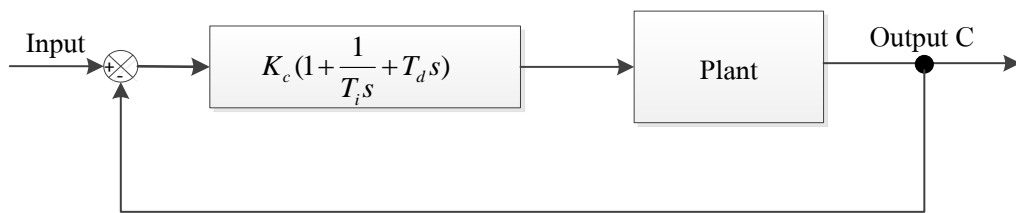
สิ่งสำคัญอย่างหนึ่งในการสังเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม คือหากตัวควบคุมมีการออกแบบในแนวทางที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ตัวควบคุมที่ได้พัฒนาขึ้นจะมีรูปแบบเป็น P, PI และ PID ซึ่งจะพิจารณาการใช้งานจากรูปแบบของกระบวนการที่ง่ายที่สุดไปจนถึงกระบวนการที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น เปรียบเทียบกับตัวควบคุมที่ใช้ในกระบวนการทางอุตสาหกรรมที่ได้พัฒนาขึ้นคือตัวควบคุม P, PI และ PID ซึ่งเป็นตัวควบคุมที่มีรูปแบบง่ายที่สุดไปจนถึงตัวควบคุมที่มีการซับซ้อนมากยิ่งขึ้นตามลำดับ [26]

ตาราง 2-1 การสังเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของคาห์ลิน [26]

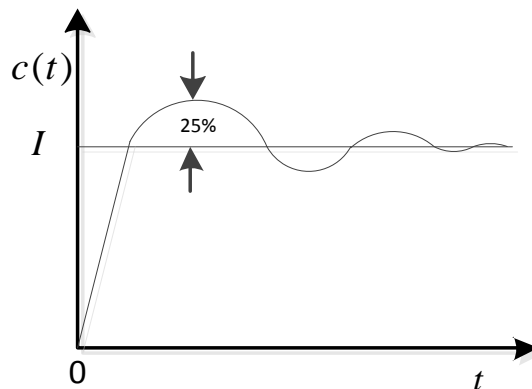
| Process | Controller | Tuning Parameter |
|--|------------------------|--|
| $G(s) = K$ | <i>P</i> | $K_c = \frac{1}{K\tau_c}$ tunable |
| $G(s) = \frac{K}{\tau s + 1}$ | <i>PI</i> | $K_c = \frac{1}{K\tau_c}$ tunable |
| $G(s) = \frac{K}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}$ $\tau_1 > \tau_2$ | <i>PID</i> | $K_c = \frac{1}{K\tau_c}$ tunable |
| $G(s) = \frac{Ke^{-t_0 s}}{(\tau s + 1)}$ | <i>PIDⁿ</i> | $T_i = \tau_1, T_d = \tau_2$ $K_c = \frac{1}{K(t_0 + \tau_c)}$ tunable $T_i = \tau_1, T_d = \frac{t_0}{2}$ |

2.10 การปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ด้วยวิธี Quarter decay ratio

ในปัจจุบันวิธีของ Quarter decay ratio เป็นวิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยการหาค่า K_c , T_i และ T_d จะขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของผลตอบสนองชั่วคราวของระบบที่ถูกควบคุม ซึ่งมีอยู่ 2 วิธี แต่ละวิธีมีจุดมุ่งหมายที่จะให้ผลตอบสนองของกระบวนการต่ออินพุตแบบขั้นบันไดมีค่าพุ่งเกินสูงสุดไม่เกิน 25% หรือ 1 ใน 4 ส่วนของค่าเอาต์พุต



ภาพประกอบ 2-24 แสดงโครงสร้างของระบบควบคุมแบบ PID



ภาพประกอบ 2-25 ผลตอบสนองของกระบวนการเมื่อปรับค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีของ Quarter decay ratio

เราใช้การปรับค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีของ Quarter decay ratio แสดงในตารางที่ 2-2 ในการสังเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของ Quarter decay ratio คือ ค่าอัตราขยายแบบสัดส่วน K_c ค่า Derivative time T_d และค่า Integral time T_i เพื่อให้สอดคล้องกับตัวควบคุมชนิด P PI และ PID พิจารณาสมการของตัวควบคุม PID ในตารางที่ 2-2 ค่าอัตราขยายแบบสัดส่วน K_c ขึ้นอยู่กับ 3 ตัวแปรหลักก็คือ ค่าอัตราขยายของกระบวนการ K ค่าเวลาไถ่การตอบสนองของกระบวนการ t_0 ค่าหน่วงเวลาคงที่ของกระบวนการ τ โดยค่าอัตราขยายของระบบเรากำหนดมาจากอัตราส่วนของ

ผลต่างของแรงดันสูงสุดและต่ำสุดที่ได้จากการวัดค่าจากเครื่องจักรเปรียบเทียบกับความดันก๊าซที่เราจ่ายให้ในช่วง 1.6 – 2 psi หรือใช้สมการที่ 2.20 ในการคำนวณ ผลกระทบเมื่อค่า K_c มีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิมจะทำให้ K_c มีค่าลดลง ในขณะที่เดียวกันเราทำการพิจารณาค่า t_0 กับผลกระทบต่อค่า K_c เราสามารถคำนวณค่า t_0 ได้จากสมการที่ 2.23 เช่นเดียวกันคือเมื่อ t_0 มีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ K_c มีค่าลดลง ทั้งนี้ t_0 ยังส่งผลให้ T_i และ T_d มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มค่า t_0 ในทางกลับกันเมื่อเราเพิ่มค่า τ จะทำให้ K_c มีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ผลกระทบเมื่อค่าของ K_c , T_i และ T_d มีการเปลี่ยนแปลงจะทำให้ระบบใช้เวลาในการเข้าสู่ Setpoint นานขึ้น ระบบไม่สามารถเข้าสู่แรงดัน Setpoint ได้ หรือถ้ามีการเปลี่ยนแปลงค่า t_0 จนทำให้ K_c มีค่าเพิ่มมากขึ้น ระบบอาจเกิดการพุ่งเกินของแรงดันเกินกว่า 25% ได้

ดังนั้นในการใช้งานตารางที่ 2-2 จึงมีข้อกำหนดคือ เราจะใช้ตารางนี้ได้ต่อเมื่ออัตราส่วนระหว่าง t_0 และ τ มีค่าทำอยู่ระหว่าง 0.1 ถึง 0.5 เท่านั้น [26]

ตาราง 2-2 การสังเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของ Quarter decay ratio [26]

| ชนิดของตัวควบคุม | Proportional gain, K_c | Integral time, T_i | Derivative time, T_d |
|------------------|--|-------------------------|------------------------|
| P | $\frac{1}{K} \left(\frac{t_0}{\tau} \right)^{-1}$ | – | – |
| PI | $\frac{0.9}{K} \left(\frac{t_0}{\tau} \right)^{-1}$ | $3.33t_0$ | – |
| PID | $\frac{1.2}{K} \left(\frac{t_0}{\tau} \right)^{-1}$ | $2.0t_0$ | $0.5t_0$ |

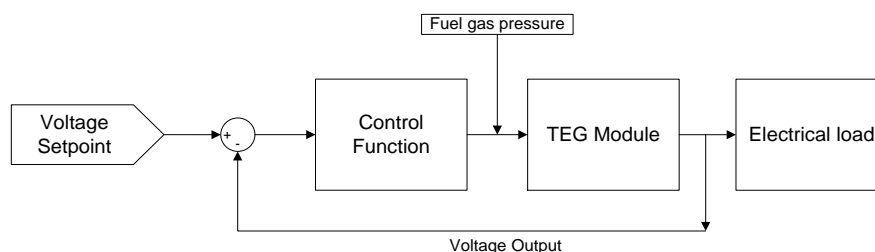
การปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบต่างๆ ดังได้กล่าวไว้ข้างต้น สิ่งสำคัญที่สุดคือการควบคุมระบบเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตตาม Setpoint ในเวลาที่น้อยกว่า 30 นาที โดยค่าเอาต์พุตต้องมีการฟุ้งเกินของแรงดันไม่มากกว่า 25% ของแรงดัน 6.7 V ดังนั้นเราจึงเลือกการปรับค่าพารามิเตอร์ของ Quarter decay ratio และ Dahlin synthesis เพื่อทำการศึกษาผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้า สิ่งที่เหมือนกันของการปรับค่าพารามิเตอร์ทั้งสองแบบคือ สามารถใช้ได้กับระบบที่เป็น 1st Order และ FOPDT โดยตัวแปรต่างๆของระบบเช่น K t_0 และ τ ถูกนำมาใช้เพื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ของตัวปรับจูน อีกทั้งง่ายต่อการปรับแต่งและสามารถนำไปใช้ในการควบคุมได้จริง และความแตกต่างของการปรับค่าพารามิเตอร์ทั้งสองแบบคือ Quarter decay ratio ใช้ค่า t_0 ในการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของตัวปรับจูน แต่ Dahlin synthesis ใช้ค่า τ และ t_0 ในการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของ Quarter decay ratio สามารถเกิดการฟุ้งเกินของแรงดันน้อยกว่า 25% แต่ Dahlin synthesis ไม่เกิดการฟุ้งเกินหรือเกิดการฟุ้งเกินน้อยกว่า Quarter decay ratio ผลตอบสนองของระบบที่ได้จากการปรับค่าพารามิเตอร์แบบ Dahlin synthesis จะเข้าถึงจุด Setpoint ช้ากว่าการปรับค่าพารามิเตอร์แบบ Quarter decay ratio ทั้งนี้เนื่องมาจากการใช้ค่า τ ที่เป็นตัวหน่วงเวลาของระบบมาคำนวณค่าพารามิเตอร์ [26]

บทที่ 3

การออกแบบระบบควบคุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเทอร์โมอิเล็กทริก

บทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบแบบจำลองของระบบควบคุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเทอร์โมอิเล็กทริกโดยใช้วิธีการควบคุมพีไอดีในการควบคุมปริมาณความดันก๊าซธรรมชาติที่จ่ายให้กับระบบ เพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตตามที่ผู้ใช้งานต้องการ ในการออกแบบแบ่งเป็น 2 ส่วนด้วยกันคือ ส่วนการออกแบบแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเทอร์โมอิเล็กทริก และส่วนการออกแบบแบบจำลองของตัวควบคุมพีไอดี โดยการออกแบบระบบในส่วนแรกคือการออกแบบแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเทอร์โมอิเล็กทริกนั้น เราทำการเก็บข้อมูลของแรงดันไฟฟ้าเปรียบเทียบกับเวลา โดยค่าแรงดันไฟฟ้าถูกเก็บข้อมูลจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจริง จากนั้นนำข้อมูลมาทำการสร้างแบบจำลองในโปรแกรม MATLAB Simulink และทำการทดสอบแบบจำลองโดยการป้อนความดันก๊าซค่าต่างๆ เพื่อดูผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าและทำการเปรียบเทียบกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจริง ในส่วนที่สองคือการออกแบบตัวควบคุมพีไอดี เราใช้การปรับแต่งตัวควบคุมพีไอดี 2 แบบด้วยกันคือ การปรับแต่งแบบ Quarter decay ratio และการปรับแต่งแบบ Dahlin synthesis จากนั้นทำการทดสอบระบบควบคุมโดยการป้อนค่าแรงดันไฟฟ้าที่ต้องการทางด้านอินพุตของระบบ แล้วพิจารณาและเปรียบเทียบผลตอบสนองแรงดันไฟฟ้าของตัวควบคุมทั้งสองชนิด โดยการเก็บข้อมูลจากแบบจำลอง เราได้ทำเฉพาะ Simulation model ในโปรแกรม MATLAB Simulink เท่านั้น

3.1 การทำงานของระบบและภาพรวมในการออกแบบ

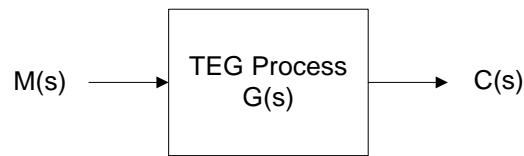


ภาพประกอบ 3-1 บล็อกไดอะแกรมของแบบจำลองระบบควบคุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเทอร์โมอิเล็กทริก

การทำงานของระบบควบคุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเทอร์โมอิเล็กทริก สามารถอธิบายได้จากภาพประกอบ 3-1 โดยการทำงานเริ่มจากการตั้งค่าแรงดันไฟฟ้าในบล็อก Voltage setpoint ในบล็อกนี้เราสามารถกำหนดค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดให้มีขนาดเท่ากับ 6.7-7.6 V โดยค่าที่กำหนดได้มาจากแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่เครื่อง TEG สามารถผลิตได้ในการทดสอบการทำงานจริง เมื่อเราตั้งค่าความดันก๊าซธรรมชาติที่ 1.6 – 2.4 psi จากนั้นสัญญาณการตั้งค่าแรงดันไฟฟ้าถูกส่งต่อไปยังบล็อก Sum เพื่อทำการเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าจากการตั้งค่า Voltage setpoint กับแรงดันไฟฟ้าจริงทางด้านเอาต์พุตของแบบจำลอง เมื่อทำการเปรียบเทียบสัญญาณทั้งสองเรียบร้อยแล้ว ระบบจะส่งผลต่างของสัญญาณหรือที่เราเรียกว่า Error ไปยังบล็อกถัดไปคือ Control function ในบล็อกนี้เราจะทำการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีที่กล่าวไว้ข้างต้น ในส่วนการทำงานของบล็อก Control function จะทำการปรับค่าทั้งหมด 3 ตัวแปรด้วยกันคือ ค่าอัตราขยาย ค่าเวลาปริพันธ์ และค่าเวลาอนุพันธ์ โดยการปรับค่าจะเป็นแบบอัตโนมัติ จุดประสงค์เพื่อให้ได้แรงดันเอาต์พุตที่มีค่าใกล้เคียงกับ Voltage setpoint โดยไม่มีค่าฟุงเกินของแรงดันไฟฟ้ามากกว่า 25% และใช้เวลาเข้าสู่ Voltage setpoint อย่างรวดเร็ว โดยสัญญาณที่ออกจากบล็อกนี้ จะเป็นค่าความดันก๊าซที่เหมาะสมซึ่งจะมีค่าไม่เกิน 2.4 psi จากนั้นสัญญาณของความดันก๊าซจะถูกส่งต่อไปยังบล็อก TEG module ในส่วนการออกแบบบล็อกนี้เราต้องสร้างขึ้นเป็น Module แรกเพราะวัตถุประสงค์ในการสร้างบล็อกนี้เพื่อให้บล็อกนี้ทำงานเสมือนเครื่อง TEG จริงและเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพใกล้เคียงเครื่อง TEG มากที่สุด ในการออกแบบ เราทำการเก็บข้อมูลเป็นระยะเวลามากกว่า 6 เดือนเพื่อให้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ มีความแม่นยำมากที่สุด จากนั้นบล็อก TEG module จะทำการกำเนิดแรงดันไฟฟ้าและจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับโหลด

3.2 การออกแบบ TEG module

ในการออกแบบแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเทอร์โมอิเล็กทริก ทำการทดลองที่ No load โดยเริ่มต้นจากการทดสอบกระบวนการแบบวงเปิด (Open loop) เพื่อเก็บค่าแรงดันเปรียบเทียบกับเวลาเพื่อหาค่า Process reaction curve โดยภาพประกอบ 3-2 แสดงบล็อกไดอะแกรมสำหรับการทำ Open loop test เราทำการป้อนอินพุตเป็นความดันก๊าซแบบขั้นบันได จากนั้นวัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้ดังแสดงตามขั้นตอนใน Laplace domain ดังต่อไปนี้



ภาพประกอบ 3-2 บล็อกไดอะแกรมสำหรับการทำ Open loop test

ในการสร้างแบบจำลอง FOPDT ของ TEG Module จะต้องมีฟังก์ชันถ่ายโอนที่ใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์ ดังแสดงตามสมการ

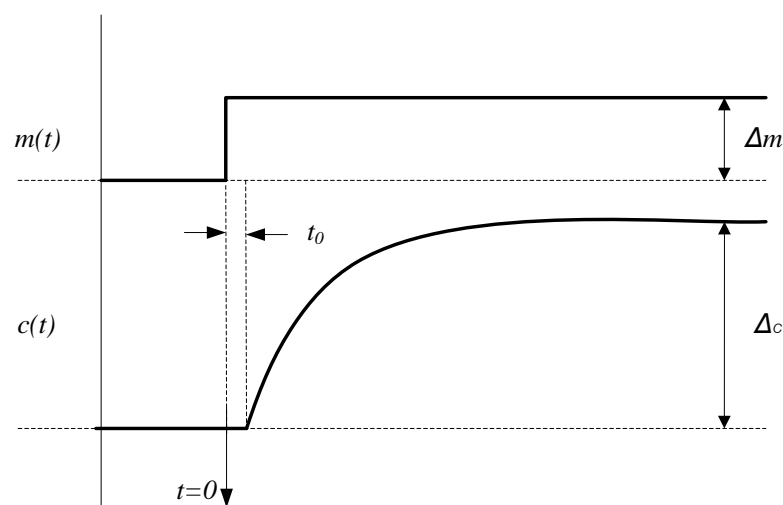
$$G(s) = \frac{Ke^{-t_0s}}{\tau s + 1} \quad (3.1)$$

เมื่อ K คือ อัตราขยายของกระบวนการ (Process gain)

t_0 คือ ค่าเวลาไร้การตอบสนองของกระบวนการ (Process dead time)

τ คือ ค่าหน่วยเวลาคงที่ของกระบวนการ (Process time constant)

เราทำการป้อนอินพุตขั้นบันได $m(t)$ เข้าสู่กระบวนการ จากนั้นค่าของเอาต์พุต $c(t)$ จะถูกวัดค่าและนำมาวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $c(t)$ เทียบกับระยะเวลา เราจะเห็นผลตอบสนองของกระบวนการแบบวงเปิดต่อสัญญาณขั้นบันไดดังแสดงในภาพประกอบที่ 3-3



ภาพประกอบ 3-3 ผลตอบสนองของกระบวนการแบบวงเปิดต่อสัญญาณขั้นบันได

$$K = \frac{\Delta c}{\Delta m} \quad (3.2)$$

โดยที่ Δc คือ ผลต่างของแรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุท
 Δm คือ ผลต่างของความดันก๊าซที่จ่ายให้กับระบบ

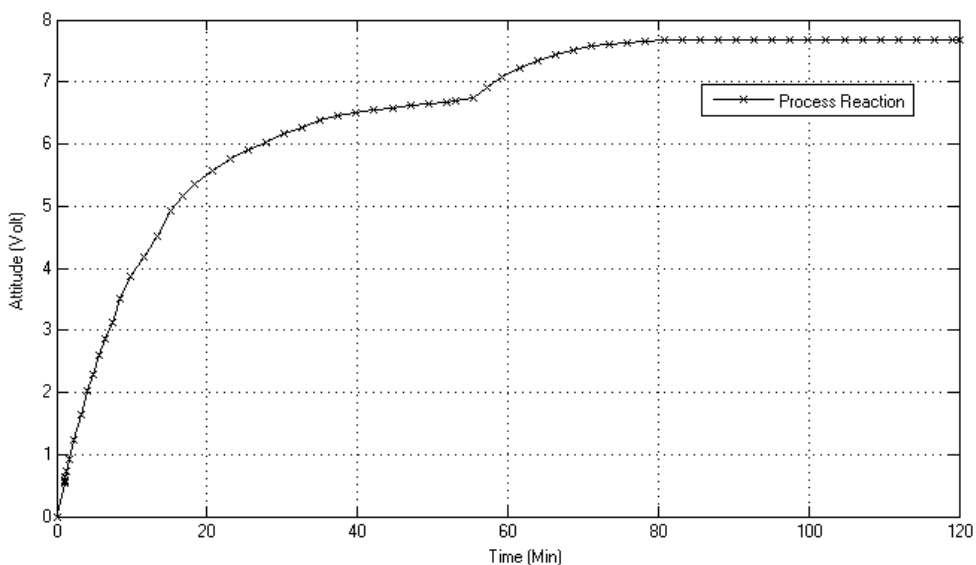
การทำ Process step testing เริ่มจากการบันทึกค่าแรงดันเอาต์พุทเปรียบเทียบกับเวลาโดยการตั้งค่าเครื่องจักรเพื่อทำการทดลองแสดงในภาพประกอบ 3-4 เริ่มต้นเราทำการต่อสายท่อก๊าซธรรมชาติจากถังก๊าซเข้าทางท่อขนาด $\frac{1}{2}$ นิ้ว จากนั้นเราทำการปรับความดันก๊าซธรรมชาติให้มีค่าสอดคล้องกับกฎการ Start up เครื่อง TEG โดยการสังเกตค่าความดันจาก Digital pressure gauge ขึ้นต่อไปเราทำการต่อสาย Probe ของโวลต์มิเตอร์เพื่อทำการวัดแรงดันไฟฟ้าที่เอาต์พุทของเครื่องจักร ในขณะที่เราทำการวัดเราทำการจดบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าเปรียบเทียบกับเวลาทุกๆ 1 นาที และนำค่าแรงดันเปรียบเทียบกับเวลาที่ได้ไปทำการวาดเป็น Process reaction curve เพื่อใช้ในการหาค่า Transfer function ในการทดลองนี้ระดับของความดันก๊าซขาเข้าจะทำตามคู่มือขั้นตอนการ Start up เครื่อง TEG โดยเรากำหนดให้อุณหภูมิทางด้านร้อนและเย็นมีค่าคงที่เมื่อ TEG ทำงานในสภาวะคงที่ และกำหนดให้ค่าอุณหภูมิโดยรอบ (Ambient temperature) มีค่าคงที่ตลอดระยะเวลาการทดลอง



ภาพประกอบ 3-4 แสดงการติดตั้งในการทดลอง

สำหรับการป้องกันความดันก๊าซขาเข้าเราจะป้องกันความดันก๊าซ 2 ระดับเพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายกับ Thermopile โดยระดับแรกเราจ่ายความดันก๊าซเท่ากับ 1.6 psi (40% ของความดันก๊าซ) จากนั้นบันทึกค่าที่ได้จนกว่าแรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตจะคงที่ ขั้นตอนนี้ใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมงหรือมากกว่านั้น เมื่อแรงดันไฟฟ้ามีค่าคงที่ เราจะทำการเพิ่มความดันก๊าซเท่ากับ 2 psi (50% ของความดันก๊าซ) จากนั้นจดบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้ทุกๆ 1 นาทีเช่นเดิม ในขั้นตอนนี้เราจะได้อ่านค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตสูงสุดเพื่อนำไปคำนวณอัตราขยายของระบบ

ในการเก็บตัวอย่างแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตเปรียบเทียบกับเวลาเราจะทำการเก็บตัวอย่างจำนวน 30 ตัวอย่าง ดังแสดงในภาพประกอบ 3-5 เราสามารถคำนวณค่าเบี่ยงเบนจำเพาะของกลุ่มตัวอย่างและพิจารณาว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้คือ น้อยกว่า 5% ค่า SD ที่ได้จากการคำนวณจากกลุ่มตัวอย่างของเราคือ 0.003 หรือประมาณ 0.3% จากนั้นเราจะนำค่าเฉลี่ยของแรงดันไฟฟ้าเปรียบเทียบกับเวลาวาดเป็นเส้นกราฟดังแสดงในภาพประกอบ 3-5

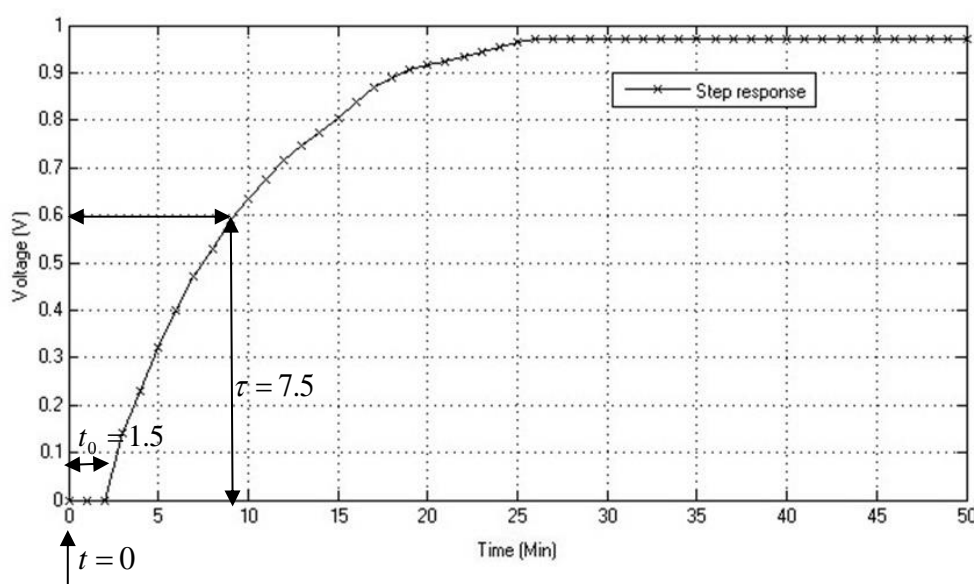


ภาพประกอบ 3-5 กราฟค่าเฉลี่ยปฏิกิริยาของกระบวนการจากเครื่อง TEG

การจ่ายความดันก๊าซ 2 ระดับเริ่มจากค่าที่น้อยที่สุดที่เครื่องจักรสามารถทำงานได้ และแรงดันค่าที่สองคือค่าแรงดันน้อยที่สุดที่ทำให้เครื่องจักรมีแรงดันเอาต์พุตตามที่ผู้ใช้งานต้องการ ในที่นี้ คือ 1.6 psi และ 2.0 psi ตามลำดับตามที่กล่าวไว้ข้างต้น เหตุผลหลักคือการทำตามกฎการ Start up เครื่อง TEG และเหตุผลต่อมาคือเพื่อทำให้เครื่องจักรมีการทำงานให้เต็มประสิทธิภาพในช่วงเริ่มต้นทำงานโดยใช้ความดันก๊าซซึ่งมีค่าน้อยที่สุด อนึ่งการจ่ายค่าความดันน้อยสุดก็เพื่อการรักษา Thermopile

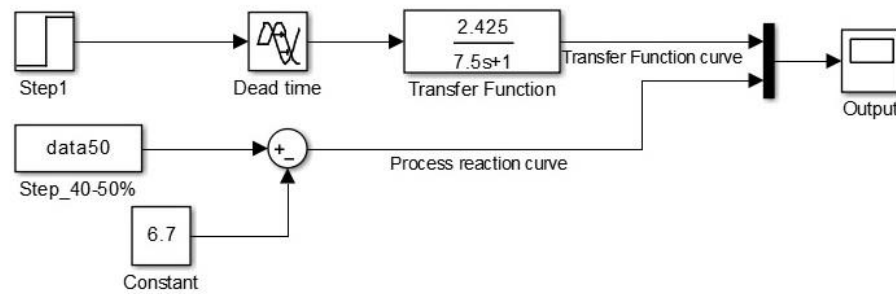
ให้มีการใช้งานที่ยืนยาวอีกทางหนึ่งด้วย ในส่วนของความดันก๊าซระดับที่สอง เราได้ทำการทดลองค่าความดันก๊าซที่น้อยที่สุดที่ทำให้เครื่องจักรสามารถจ่ายแรงดันที่ 6.7 V เราจึงได้ค่าความดันก๊าซที่ 2.0 psi

จากภาพประกอบ 3-5 เราเลือกช่วงเวลาที่แรงดันไฟฟ้ามีค่าคงที่ช่วงที่ 2 มาทำการ Fit curve เพราะช่วงเวลานี้ TEG จะกำหนดค่าแรงดันจริงที่เครื่องจักรจ่ายให้แก่โหลดทางไฟฟ้า และเป็นช่วงที่เครื่องจักรทำงานเต็มทีเมื่อเปรียบเทียบกับความดันก๊าซที่เราจ่ายให้ การ Fit curve ก็คือการเปรียบเทียบกราฟผลตอบสนองของระบบและผลตอบสนองระหว่าง Process reaction curve และ Transfer function curve โดยใช้ ทฤษฎีของ FOPDT model ทำการ Fit curve ในโปรแกรม MATLAB ตามลำดับเพื่อเลือก Transfer function ที่เหมาะสมที่สุดของระบบ โดยเราสามารถวาดภาพได้ใหม่ ดังแสดงตามภาพประกอบ 3-6

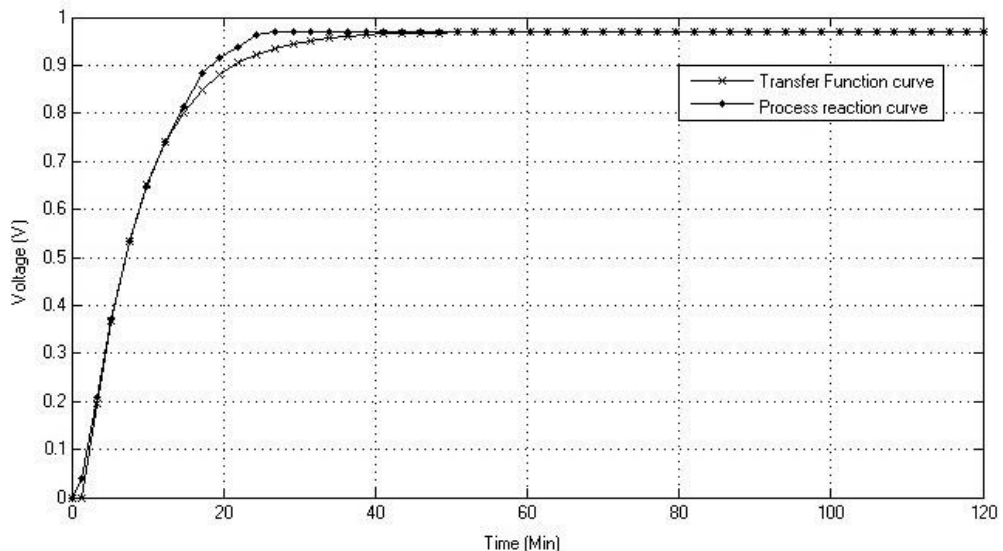


ภาพประกอบ 3-6 ผลตอบสนองแรงดันไฟฟ้าเปรียบเทียบเวลาจากการทดลอง

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของ FOPDT เราสามารถพิจารณาได้จากภาพประกอบ 3-6 โดยขั้นแรกเรานำค่าแรงดันเปรียบเทียบกับเวลาทำการวาดกราฟในโปรแกรม MATLAB ซึ่งจะอยู่ใน Block data50 ของภาพประกอบ 3-7 เราทำการป้อนค่าแรงดันเปรียบเทียบกับเวลาเริ่มตั้งแต่นาทีที่ 0 จนถึงนาทีที่ 50 ขึ้นต่อมาเราทำการสร้างกราฟ Trasfer function โดยใช้ Block Step1, Dead time, Transfer function และ Block Output เพื่อทำการเปรียบเทียบเส้นกราฟทั้งสอง



ภาพประกอบ 3-7 การจำลองบล็อกไดอะแกรมสำหรับตรวจสอบต้นแบบ FOPDT
ที่ได้มาสำหรับระบบ TEG



ภาพประกอบ 3-8 เปรียบเทียบระหว่างการตอบสนองที่เกิดขึ้นจริงและการจำลองโดยใช้แบบจำลอง

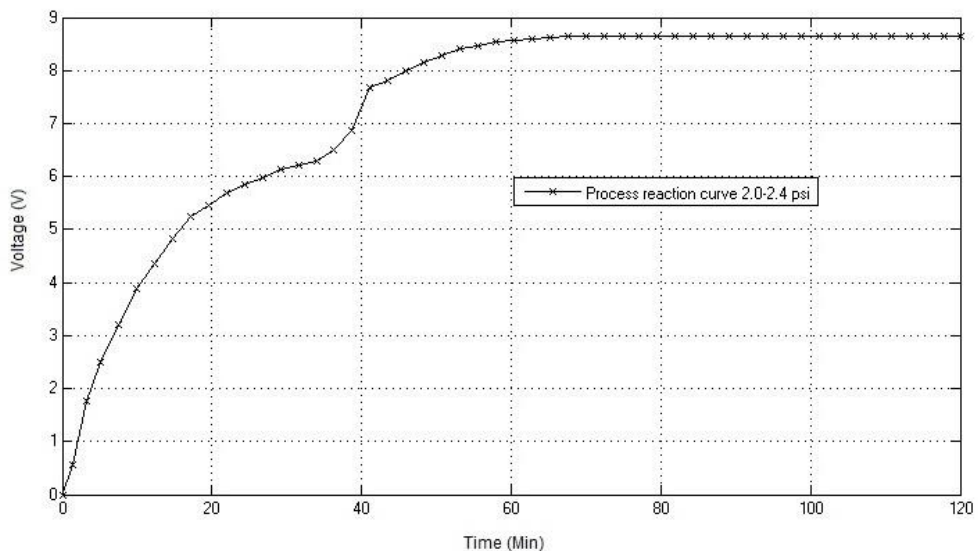
ผลตอบสนองของทั้ง 2 กราฟต้องมีค่าใกล้เคียงกันสัณทิตเพื่อให้ได้ค่า Transfer function ที่ตรงกับการทำงานของระบบมากที่สุดดังภาพประกอบ 3-8 จากรูปเวลาที่เข้าสู่ภาวะคงตัวของแรงดันทั้ง 2 กราฟ มีค่าใกล้เคียงกันคือ ประมาณ 40 นาที ค่า Dead time (t_0) มีค่าเท่ากันคือ 1.5 นาที และช่วง Rise time ทั้งสองที่สัณทิตเมื่อให้ Time constant (τ) เท่ากับ 7.5 จากสมการ FOPDT จากสูตร เราสามารถหาค่า K ได้จาก

$$K = \frac{\Delta c}{\Delta m} = \frac{7.67 - 6.7}{2.0 - 1.6} = 2.425 \quad (3.3)$$

เมื่อเราได้ค่าพารามิเตอร์ของ FOPDT แล้ว ดังนั้นเราจึงเขียน Transfer function ของระบบได้เป็น

$$G(s) = \frac{2.425e^{-1.5s}}{7.5s+1} \quad (3.4)$$

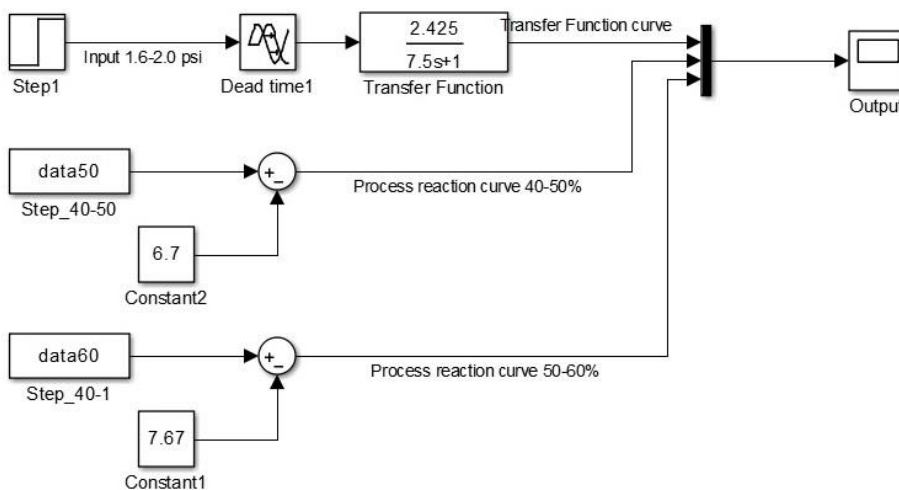
ต่อมาเป็นการสอบเทียบค่า Transfer function ที่เราได้จากการทำการ Fit curve โดยการสอบเทียบค่า Transfer function ทำให้โดยตรวจสอบค่า Step input response ที่จุดอื่นบนเส้นกราฟการตอบสนองของระบบโดยเลือกข้อมูลที่ input pressure 50%-60% ของความดันก๊าซสูงสุดคือ 2.0 psi จากนั้นทำการเปรียบเทียบเส้นกราฟทั้งสอง เพื่อพิสูจน์ว่าในการหาค่า Transfer function ของระบบ เราสามารถทำได้ทุกช่วงเวลาบนเส้นกราฟ Process reaction curve ในทำนองเดียวกัน เราเก็บตัวอย่างแรงดันไฟฟ้าเอาท์พุทเปรียบเทียบกับเวลา เราทำการเก็บตัวอย่างจำนวน 30 ตัวอย่าง ดังแสดงในภาพประกอบ 3-9 และคำนวณค่าเบี่ยงเบนจำเพาะของกลุ่มตัวอย่างจากนั้นพิจารณาว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้คือ ค่าเบี่ยงเบนจำเพาะน้อยกว่า 5%



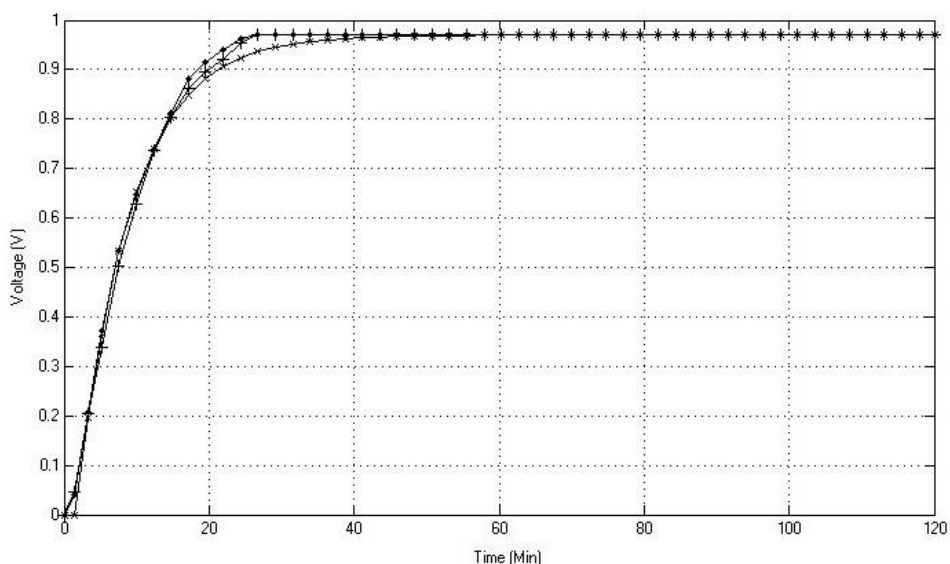
ภาพประกอบ 3-9 แรงดันเอาท์พุทเปรียบเทียบกับเวลา ความดันก๊าซ 2.0-2.4 psi

จากนั้นเราทำการสร้างบล็อกไดอะแกรมในโปรแกรม MATLAB เพื่อทำการ Fit curve ของ FOPDT transfer function ระหว่าง Process reaction curve และ Transfer function curve

ตามภาพประกอบ 3-10 โดยใช้ความดันก๊าซเท่ากับ 40%-50% เปรียบเทียบกับความดันก๊าซเท่ากับ 50%-60% ของความดันก๊าซสูงสุด 4 psi โดยตั้งค่าเท่ากับ 1.6 – 2.0 psi และ 2.0 – 2.4 psi ตามลำดับ



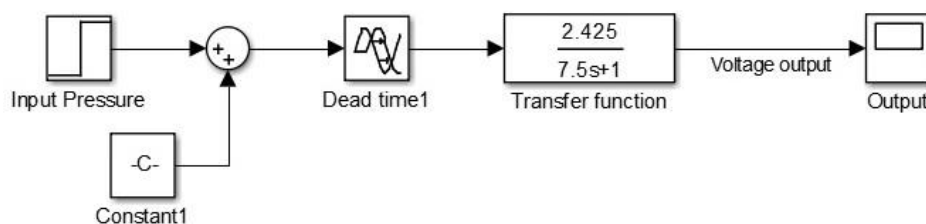
ภาพประกอบ 3-10 การจำลองบล็อกไดอะแกรมเมื่อให้ความดันก๊าซเท่ากับ 40%-50% เปรียบเทียบกับความดันก๊าซเท่ากับ 50%-60%



ภาพประกอบ 3-11 เปรียบเทียบผลตอบสนองของเครื่อง TEG เมื่อให้ความดันก๊าซขาเข้าเท่ากับ 40%-50% และความดันก๊าซขาเข้าเท่ากับ 50%-60% กับการใช้แบบจำลองใน MATLAB

เราพิจารณาผลตอบสนองที่ได้ โดยการเปรียบเทียบเส้นกราฟ Process reaction curve ทั้ง 2 ช่วงกับ Transfer function curve ดังแสดงได้ตามภาพประกอบ 3-11 จากการพิจารณาเส้นกราฟทั้งสามทับกันสนิท ทำให้เราตัดสินใจได้ว่าเมื่อเราทำการเก็บข้อมูลจากเครื่อง TEG เครื่องเดียวกัน เราสามารถพิจารณาสร้าง Process reaction curve จากจุดใดจุดหนึ่งบนเส้นกราฟเพื่อให้ได้ผลตอบสนองของ Transfer function ที่มีค่าใกล้เคียงกับผลตอบสนองที่ได้จริงจากเครื่อง TEG มากที่สุด ดังนั้นผลตอบสนองของระบบที่ใช้ Transfer function เดียวกันสามารถนำไปใช้กับระบบของเราได้

จากนั้นเราทำการทดสอบ Transfer function ของระบบ โดยการปรับเปลี่ยนความดันก๊าซ และวัดค่าแรงดันสูงสุดของแบบจำลองเปรียบเทียบกับค่าจริงจากเครื่องจักร ในการทดสอบ เราทำการจ่ายความดันก๊าซ 1.6 psi 1.8 psi 2.0 psi 2.2 psi และ 2.4 psi ตามลำดับโดยเราใช้แบบจำลองดังแสดงในภาพประกอบ 3-12 และทำการตั้งค่าเครื่องจักรดังภาพประกอบ 3-13



ภาพประกอบ 3-12 แบบจำลองในการบันทึกค่าแรงดันสูงสุด ในการจ่ายความดันก๊าซ 1.6 psi, 1.8 psi, 2.0 psi, 2.2 psi, และ 2.4 psi ตามลำดับ



ภาพประกอบ 3-13 การตั้งค่าความดันก๊าซของ TEG ใช้ Digital pressure guage เป็นตัวแสดงผล

ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่เราทำการบันทึกแสดงในตารางที่ 3-1 คือค่าแรงดันไฟฟ้าที่เราทำการพิจารณาเพื่อให้ทราบว่าเมื่อเราจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้ในระดับต่าง ๆ นั้น ระบบของเครื่องจักรจะมีค่าแรงดันไฟฟ้าที่สามารถกำเนิดได้มีค่าเป็นเท่าใด ค่าของแรงดันไฟฟ้าที่เราพิจารณาจะถูกนำไปใช้ในการออกแบบตัวควบคุม และใช้ในการคำนวณเพื่อหาค่าพลังงานไฟฟ้าที่เราใช้งานเมื่อระบบถูกต่อใช้งานร่วมกับโหลดทางไฟฟ้า

ตาราง 3-1 ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดวัดจากเครื่องจักร โดยตั้งค่าใช้งานความดันก๊าซค่าต่างๆ

| Pressure | Voltage (Model) | Voltage (Machine) |
|----------|-----------------|-------------------|
| 1.6 psi | 6.70 V | 6.70 V |
| 1.8 psi | 7.19 V | 7.20 V |
| 2.0 psi | 7.67 V | 7.67 V |
| 2.2 psi | 8.16 V | 8.16 V |
| 2.4 psi | 8.64 V | 8.64 V |

จากตารางที่ 3-1 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการจำลองการทำงานของแบบจำลองเปรียบเทียบกับค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากวัดค่าจริงจากเครื่องจักร ทั้งคู่มีค่าใกล้เคียงกันตลอดทั้งช่วงการใช้งานทุกๆ ความดันก๊าซของเครื่องจักร มีเพียงช่วงหนึ่งของความดันก๊าซ 1.8 psi เท่านั้นที่แรงดันไฟฟ้าของเครื่องจักรสูงกว่าแบบจำลองเท่ากับ 0.1 V ทั้งนี้ผลต่างที่เกิดขึ้นมาจากอุณหภูมิโดยรอบเครื่องจักรในวันที่ทดลองเปลี่ยนไปทำให้ Ambient temperature เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันเอาท์พุทระหว่างแบบจำลองและเครื่องจักรจึงมีค่าต่างกันเล็กน้อย จากผลที่ได้เราสามารถพิสูจน์ได้ว่าเราสามารถนำแบบจำลองนี้ไปใช้งานจริงได้

3.3 การออกแบบแบบจำลองของตัวควบคุม TEG

การออกแบบแบบจำลองของตัวควบคุม TEG สิ่งสำคัญที่สุดคือ Process transfer function ซึ่งทำให้เราสามารถนำค่าพารามิเตอร์ต่างๆมาทำการออกแบบตัวควบคุม PID ได้ เราใช้การควบคุมแบบ Quarter decay ratio นำมาเปรียบเทียบกับ Dahlin synthesis โดยที่การควบคุมแบบ Quarter decay ratio จะใช้วิธี Trial and error บนพื้นฐานของการ Oscillations ที่ออกแบบโดย Ziegler-Nichols อีกวิธีหนึ่งคือ Dahlin synthesis ที่ออกแบบโดย Dahlin ซึ่งเป็นผู้ปรับแต่งพารามิเตอร์ซึ่งมีผลต่อกันตามค่าคงที่ Closed loop time การเชื่อมต่อระหว่าง Transfer function และรูปแบบของการควบคุมแบบ PID สามารถจะจัดตั้งขึ้นจาก Controller synthesis

วิธีการนี้สามารถนำเสนอชุดของสูตรตามพารามิเตอร์ของแบบจำลองแบบ First order กับกราฟกระบวนการปฏิกิริยา ตามสมการ FOPDT ผลในการวิเคราะห์ได้ตามสมการดังต่อไปนี้

$$G_c(s) = \left(\frac{\tau + 1}{Ke^{-t_0s}} \right) \left(\frac{e^{-t_0s}}{\tau_c s + 1 - e^{-t_0s}} \right) \quad (3.5)$$

เพื่อแปลงอัลกอริทึมของสมการที่ 3.2 ให้ได้ตาม PID มาตรฐาน เราจึงได้ Synthesized controller transfer function แสดงดังนี้ [26]

$$G_c(s) = \left(\frac{\tau}{K(\tau_c + t_0)} \right) \left(1 + \frac{1}{\tau s} \right) \left(\frac{1 + \frac{\tau_0}{2} s}{1 + \tau s} \right) \quad (3.6)$$

Quarter decay ratio PID controller เป็นข้อเสนอแนะให้ใช้สำหรับกระบวนการแบบ Slow process หรือ Process with dead time รูปแบบ PID ตามมาตรฐานที่ได้มาจาก Quarter decay ratio controller transfer function แสดงดังนี้ [26]

$$G_c(s) = K \left(1 + \frac{1}{\tau} \left(\frac{\tau_d s}{\alpha \tau_d s + 1} \right) \right) \quad (3.7)$$

สมการที่แสดงให้เห็นว่าส่วนที่เป็น Derivative portion จะถูกคูณด้วย $1/(\alpha \tau_d s + 1)$ ซึ่งได้รับการยอมรับว่า Transfer function ของ First order ที่มีอัตราขยายของเวลาคงที่เท่ากับ $\alpha \tau_d$ ซึ่งเรียกว่าเป็นตัวกรอง ตัวกรองดังกล่าวมักไม่ได้มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของตัวควบคุมเพราะเวลาคงที่ขนาดเล็กและตัวแปร τ_d คือ Derivative time ที่ส่วนใหญ่ มักจะเป็นเวลาไม่กี่นาที [26]

สมการของ PID controller ที่ได้ปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ตาม Quarter decay ratio และ Dahlin synthesis ตามตารางที่ 3-2 ค่าตัวแปร K คือ Process gain, ตัวแปร K_c คือ Proportional gain, ตัวแปร T_i คือ Integral time, ตัวแปร T_d คือ Derivative time, ตัวแปร t_0 คือ Dead time และตัวแปร τ_c คือค่าคงที่ Closed loop time ในขณะที่ ตัวแปร τ คือ Time constant

ตาราง 3-2 สมการการปรับจูนค่าตัวแปรของ Quarter decay ratio และ Dahlin synthesis [26]

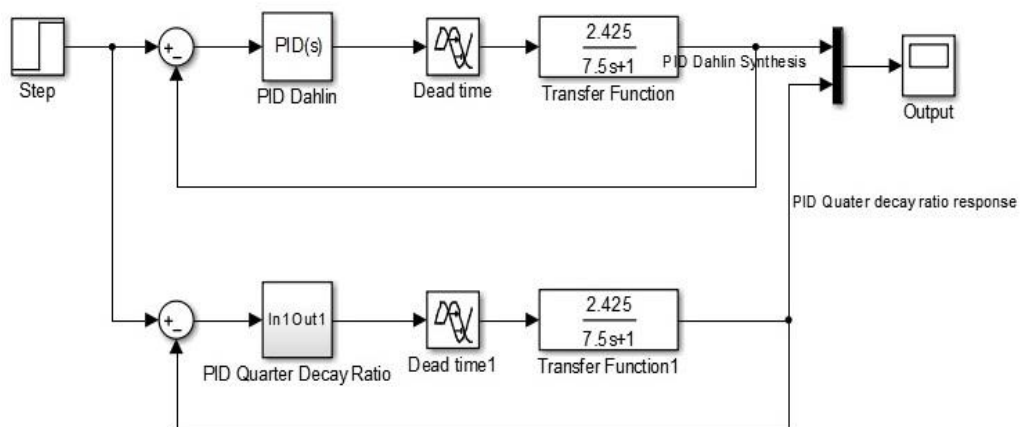
| PROCESS | PID Quarter decay ratio | PID Dahlin synthesis |
|--|--|--------------------------------------|
| FOPDT $G(s) = \left(\frac{K e^{-t_0 s}}{\tau s + 1} \right)$ | $K_c = \frac{1.2}{K} \left(\frac{t_0}{\tau} \right)^{-1}$ | $K_c = \frac{\tau}{K(t_0 + \tau_c)}$ |
| | $T_i = 2t_0$ | $T_i = \tau$ |
| | $T_d = 0.5t_0$ | $T_d = 0.5\tau$ |

จากนั้นเราทำการออกแบบระบบควบคุมแบบอัตโนมัติโดยวิธีที่เราเลือกใช้คือ Dahlin synthesis และ Quarter decay ratio เราจะเริ่มจากการหาค่า Parameter ของทั้งสองตัวควบคุมตามตารางที่ 3-2 ค่า Parameter จะได้ผลดังแสดงในตารางที่ 3-3

ตาราง 3-3 ค่าตัวแปรต่างๆของตัวควบคุม PID แบบ Quarter decay ratio และ Dahlin synthesis

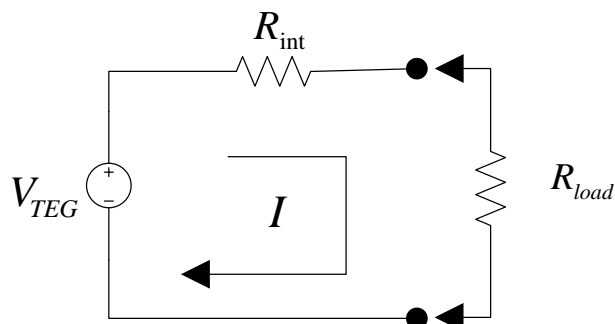
| PROCESS | PID Quarter decay ratio | PID Dahlin synthesis |
|--|-------------------------|----------------------|
| FOPDT $G(s) = \left(\frac{2.425e^{-1.5s}}{7.5s+1} \right)$ | $K_c = 2.474$ | $K_c = 1.134$ |
| | $T_i = 3.000$ | $T_i = 7.500$ |
| | $T_d = 0.750$ | $T_d = 3.750$ |

จากนั้นเราจะทำการออกแบบระบบควบคุมใน MATLAB ได้โดยการใส่ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เรากำหนดจากตารางที่ 3-3 ลงไปในบล็อก PID ของโปรแกรม MATLAB ตามภาพประกอบ 3-14 จากนั้นเราจะทำการบันทึกค่าผลตอบสนองที่ได้โดยผลตอบสนองคือแรงดันไฟฟ้าเปรียบเทียบกับเวลา



ภาพประกอบ 3-14 แบบจำลอง TEG ทำงานร่วมกับ PID Dahlin synthesis และ Quarter decay ratio บนหน้าต่างของโปรแกรม MATLAB

3.4 การออกแบบแบบจำลองของระบบเมื่อทำงานกับโหลดทางไฟฟ้า



ภาพประกอบ 3-15 วงจรสมมูล Internal resistance ของ TEG

การออกแบบแบบจำลองของระบบเมื่อทำงานกับ โหลดทางไฟฟ้าเริ่มต้นจากการหาค่าความต้านทานภายในของเครื่องจักร TEG โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการทราบความต้านทานรวมทั้งหมดของวงจร วงจรสมมูลของ (Internal resistance) (R_{int}) ของ TEG แสดงดังภาพประกอบ 3-15 ใช้ในการนำไปออกแบบตัวควบคุมที่ต้องทำงานควบคู่กับโหลดได้อย่างมีประสิทธิภาพรวมทั้งการจำลองการทำงานเพื่อที่จะหาค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่เครื่องจักรใช้งานในการทำงานปกติ อีกทั้งเรายังสามารถคำนวณกำลังไฟฟ้าที่เครื่องจักรใช้งานทั้งหมดได้อีกด้วย



ภาพประกอบ 3-16 การติดตั้ง TEG เพื่อต่อใช้งานร่วมกับ โหลดทางไฟฟ้า

เราทำการตั้งค่าใช้งานเครื่องจักรดังภาพประกอบ 3-16 เพื่อทำการบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าจริงจากเครื่องจักร TEG เพื่อหาค่าความต้านทานภายใน โดยทำการต่อโหลดภายนอกค่าต่างๆที่เรากำหนดไว้ในการทดลองเราใช้ค่าความดันก๊าซที่ 1.6 psi จากนั้นทำการเปิดวงจรทางด้านเอาต์พุทและทำการต่อค่าความต้านทานมีค่าเท่ากับ $1\ \Omega$ เข้ากับวงจร ทำการ Start up และเดินเครื่องจักร TEG ให้ได้แรงดันไฟฟ้าสูงสุด ในการทดลองนี้เราตั้งค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุด 6.80 V เพราะเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่เครื่องจักรสามารถผลิตได้เมื่อจ่ายความดันก๊าซเท่ากับ 1.6 psi จากนั้นเมื่อได้ค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าที่โหลดเรียบร้อยแล้ว บันทึกค่าที่ได้ลงในตารางที่ 3-3 ขึ้นต่อมาเราทำการเปลี่ยนค่าความต้านทานเป็น $2\ \Omega$ $5\ \Omega$ และ $10\ \Omega$ ตามลำดับ ในการทำงานเราจะต่อโหลดทางไฟฟ้าครั้งละ 1 ค่าเท่านั้น จากนั้นคำนวณหาค่าความต้านทานภายในของเครื่องจักร TEG ได้โดยใช้ทฤษฎีการแบ่งแรงดัน ดังนี้

$$I = \frac{V_{TEG}}{R_{int} + R_{load}} \quad (3.8)$$

$$R_{int} = \frac{V_{TEG}}{I} - R_{load} \quad (3.9)$$

จากนั้นเราทำการคำนวณค่า R_{int} และบันทึกค่าที่ได้ลงในตารางที่ 3-4

ตาราง 3-4 ค่าความต้านทานภายในของ TEG จากการคำนวณ

| Rload | Load voltage (Measured) | Load current (Measured) | Internal Load (Calculated) | Average Internal Load (Calculated) |
|-------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------------|--|
| 1 Ω | 5.30 V | 5.30 A | 0.28 Ω | 0.31 Ω |
| 2 Ω | 6.00 V | 3.00 A | 0.27 Ω | |
| 5 Ω | 6.50 V | 1.30 A | 0.23 Ω | |
| 10 Ω | 6.50 V | 0.65 A | 0.46 Ω | |

จากผลลัพธ์ของโหลด $10\ \Omega$ ที่เราได้ค่าความต้านทานภายใน TEG ที่แตกต่างจากโหลดค่าอื่นๆ ทั้งนี้เนื่องจากตัวต้านทานของโหลดที่เรานำมาใช้มีค่าเท่ากับ $10\ \Omega$ นั้น มีค่าเปอร์เซ็นต์

ความผิดพลาดที่แตกต่างจากความต้านทานตัวอื่น เมื่อค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดมีค่าแตกต่างกัน
 ดังนั้น ทำให้ค่ากระแสที่ได้มีค่าแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ส่งผลให้ค่าความต้านทานภายในมีค่า
 แตกต่างกันด้วย

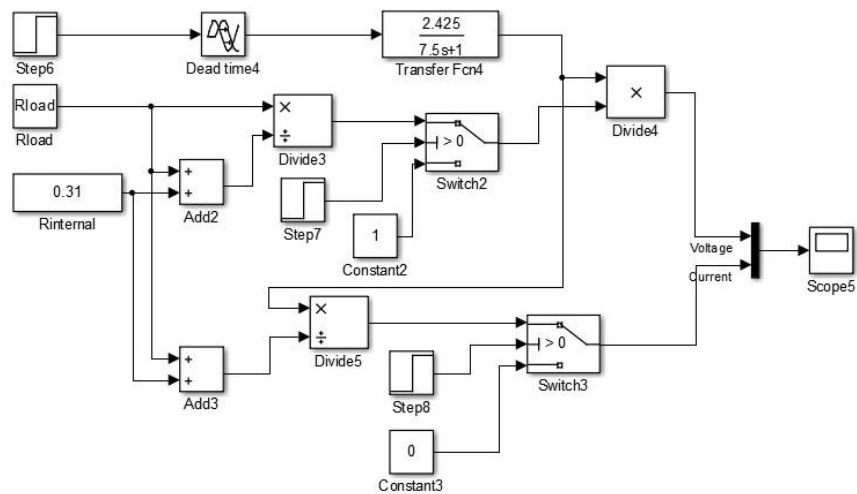
จากนั้นเราทำการหาค่าเฉลี่ยของค่าความต้านทานภายใน TEG จากการหาค่าเฉลี่ย
 ของผลลัพธ์ค่าความต้านทานภายในที่โหลดค่าต่างๆ จากสมการ 3.9 ได้ดังนี้

$$\bar{R} = \frac{\sum R}{N} \quad (3.10)$$

โดยที่ ตัวแปร \bar{R} คือ ค่าเฉลี่ย ตัวแปร $\sum R$ คือ ผลรวมของข้อมูล และ ตัวแปร N คือ จำนวน
 ของข้อมูล จากนั้นเราทำการแทนค่าผลรวมของข้อมูลและ จำนวนของข้อมูลจากตารางที่ 3-4 ลงใน
 สมการที่ 3.10 ได้ค่าดังนี้

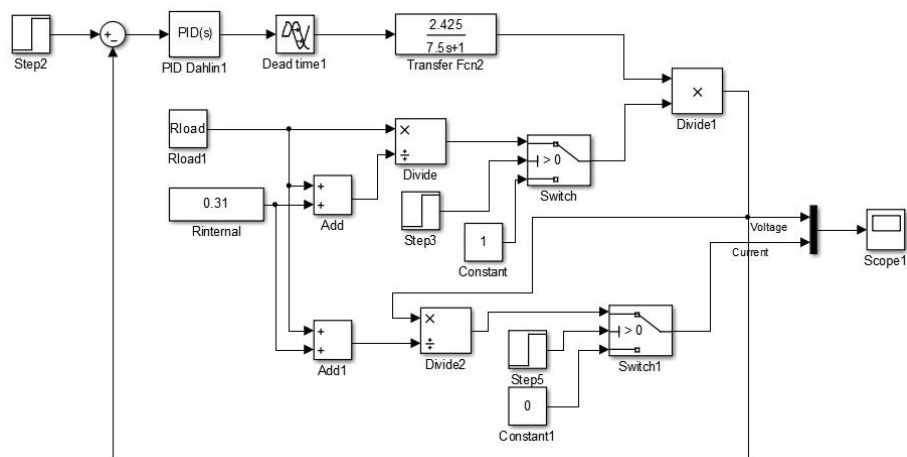
$$\bar{R} = \frac{0.28 + 0.23 + 0.27 + 0.46}{4} = 0.31 \Omega \quad (3.11)$$

จากสมการที่ 3.11 เราได้ค่าของความต้านทานภายใน TEG เท่ากับ 0.31Ω มีค่าใกล้เคียงกับค่า
 ความต้านทานภายในจริงของ TEG ดังกล่าวไว้ใน Datasheet ของเครื่องจักร ซึ่งมีค่าความต้านทาน
 ภายในเท่ากับ 0.387Ω ดังนั้นเราจึงพิจารณาใช้ค่าความต้านทานที่ได้จากการทดลองข้างต้น เพื่อใช้
 ในการออกแบบในลำดับถัดไป จากนั้นเมื่อเราได้ค่าความต้านทานภายในของ TEG แล้วจากนั้นเรา
 ทำการออกแบบระบบโดยรวมของ TEG ในโปรแกรม MATLAB ได้ดังนี้



ภาพประกอบ 3-17 บล็อกไดอะแกรมของระบบที่ไม่ใช้ตัวควบคุมและต่อโหลดทางไฟฟ้า

จากนั้นเราทำการออกแบบระบบควบคุมใน MATLAB เพื่อให้ทำงานควบคู่กับการต่อโหลดทางไฟฟ้าที่ค่าดังนี้คือ $1\ \Omega$ $2\ \Omega$ $5\ \Omega$ และ $10\ \Omega$ ตามลำดับ ตามภาพประกอบ 3-17 ในขั้นต่อไปเราจะทำการบันทึกค่าผลตอบสนองที่ได้โดยผลตอบสนองคือแรงดันไฟฟ้าเปรียบเทียบกับเวลา

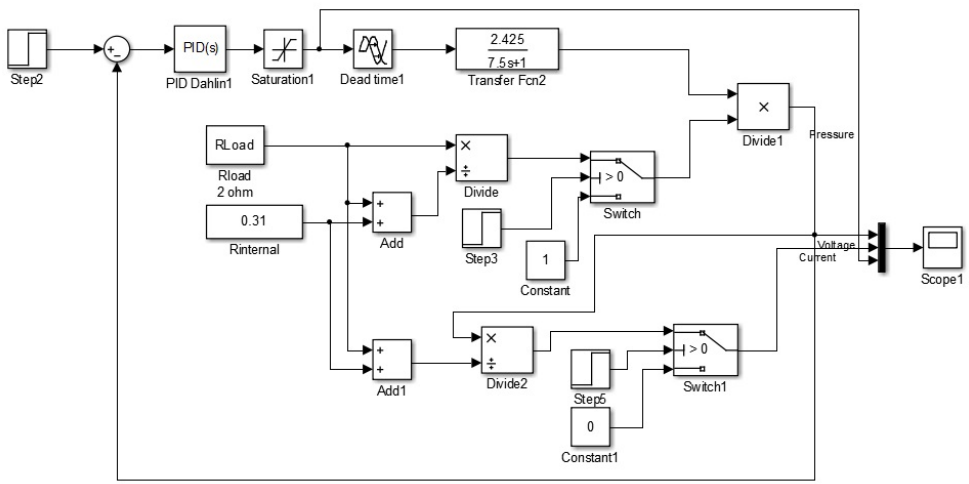


ภาพประกอบ 3-18 บล็อกไดอะแกรมของระบบที่ใช้ตัวควบคุม PID และต่อโหลดทางไฟฟ้า

จากภาพประกอบ 3-18 เราทำการออกแบบระบบโดยรวมของ TEG ในโปรแกรม MATLAB โดยในแบบจำลองเราทำการต่อโหลดภายนอกค่าต่างๆ กัน 4 ค่า คือ $1\ \Omega$ $2\ \Omega$ $5\ \Omega$ และ

$10\ \Omega$ ตามลำดับ จากนั้นทำการวัดแรงดันและกระแสไฟฟ้า ที่โหลดค่าต่างๆ รวมทั้งบันทึกกราฟแสดงผลค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้า เพื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทำงานจริงของเครื่องจักร TEG

ในขั้นตอนสุดท้ายเราใช้แบบจำลองตามภาพประกอบ 3-19 ในการทดลอง โดยทำการเพิ่มบล็อก Saturation ด้านหลังบล็อก PID เพื่อจำกัดความดันก๊าซที่ออกจากตัวควบคุมไว้ที่ 4 psi ทั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลตอบสนองของระบบโดยรวมเมื่อความดันก๊าซถูกจำกัด เพราะในการใช้งานจริงเราจำกัดความดันก๊าซสูงสุดที่เครื่อง TEG สามารถทำงานได้โดยไม่สร้างความเสียหายให้กับ Thermopile ไว้ที่ 10 psi พร้อมทั้งทำการบันทึกค่าผลตอบสนองของแรงดันและกระแสไฟฟ้าเปรียบเทียบกับเวลา

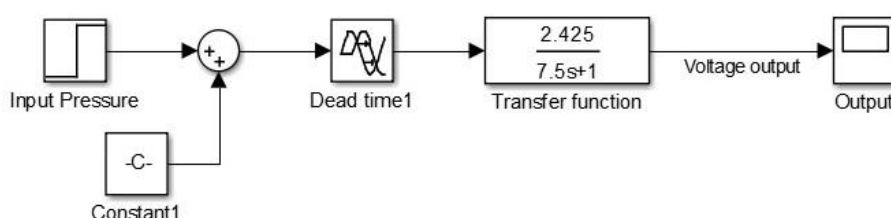


ภาพประกอบ 3-19 บล็อกไดอะแกรมของระบบที่ใช้ตัวควบคุม PID ต่อโหลดทางไฟฟ้า และจำกัดความดันก๊าซที่ไว้ที่ 4 psi

บทที่ 4

การทดลองและการวิเคราะห์ผล

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เราทำการศึกษานำเสนอผลการทดลองและอภิปรายผลของระบบควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเทอร์โมอิเล็กทริก (TEG) โดยใช้กระบวนการแบบอันดับหนึ่ง มีเวลาไร้การตอบสนอง (FOPDT) ในโปรแกรม MATLAB Simulink ภายใต้เงื่อนไขของระบบควบคุมปริมาณก๊าซธรรมชาติโดยใช้ในระบบควบคุมแบบ Proportional-Integral-Derivative (PID) เมื่อปรับแต่งด้วยพารามิเตอร์แบบ Quarter decay ratio และ Dahlin synthesis โดยการนำเสนอผลการทดลองเริ่มจากการเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตของตัวจำลองเปรียบเทียบกับเครื่อง TEG จริงภายใต้เงื่อนไขการจ่ายความดันก๊าซธรรมชาติที่มีค่าเท่ากัน โดยการจ่ายความดันก๊าซธรรมชาติ มีค่าเท่ากับ 1.6 psi 1.8 psi 2.0 psi 2.2 psi และ 2.4 psi จากนั้นเราทำการทดสอบระบบควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเทอร์โมอิเล็กทริก โดยการตั้งค่าแรงดันไฟฟ้า Voltage setpoint และทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุต วัดค่า Rise time และค่า Settling time โดยทำการเปรียบเทียบระหว่าง PID ที่ปรับแต่งด้วยพารามิเตอร์แบบ Quarter decay ratio และ Dahlin synthesis โดยผลตอบสนองถูกวาดโดยโปรแกรม MATLAB Simulink

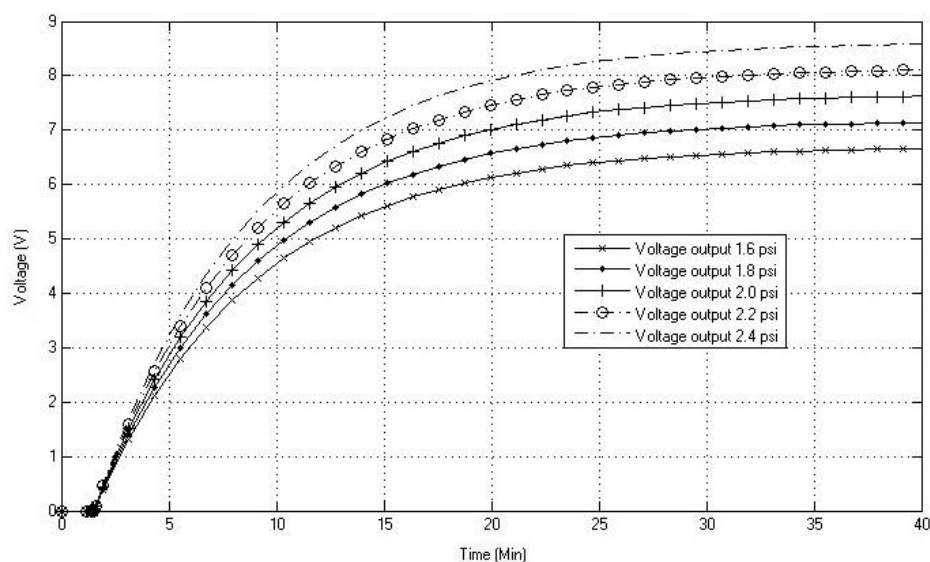


ภาพประกอบ 4-1 การจำลองบล็อกไดอะแกรมสำหรับระบบ TEG แบบ Open loop

ภาพประกอบ 4-1 แสดงการจำลองบล็อกไดอะแกรมสำหรับระบบ TEG ในการทำงานของแบบจำลอง เราทำการจ่ายค่าความดันก๊าซมีค่าเท่ากับ 1.6 psi 1.8 psi 2.0 psi 2.2 psi และ 2.4 psi ให้กับระบบ จากนั้นทำการบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าของแบบจำลองในโปรแกรม MATLAB Simulink เพื่อเปรียบเทียบกับแรงดันไฟฟ้าจริงที่วัดได้จากเครื่อง TEG

4.1 แนวทางการทดลองและการเก็บผลการทดลอง

ภาพประกอบ 4-2 แสดงผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากแบบจำลองเมื่อปรับแรงดันก๊าซ 1.6 psi ถึง 2.4 psi



ภาพประกอบ 4-2 ผลตอบสนองที่ได้จากแบบจำลองเมื่อจ่ายความดันก๊าซ 1.6 psi ถึง 2.4 psi

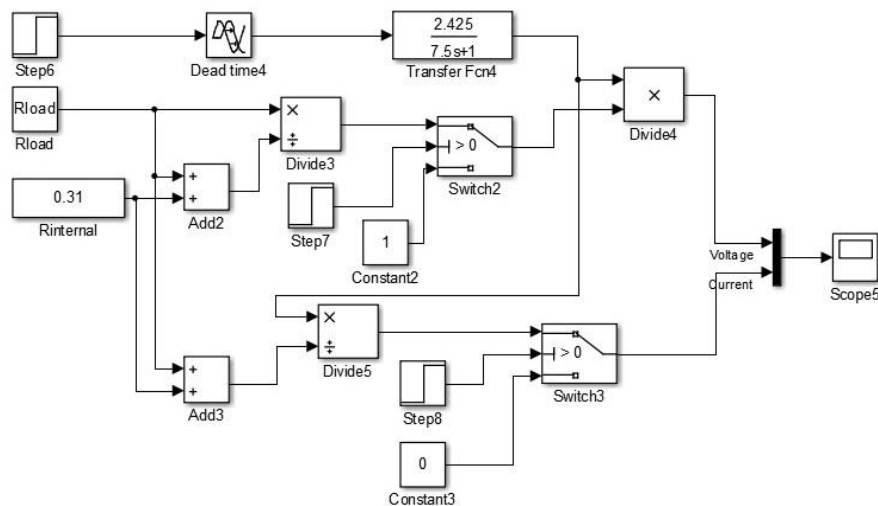
ตาราง 4-1 ผลตอบสนองที่ได้จากแบบจำลองเมื่อจ่ายความดันก๊าซ 1.6 psi ถึง 2.4 psi

| Pressure | Voltage (Model) | Voltage (Machine) |
|----------|-----------------|-------------------|
| 1.6 psi | 6.70 V | 6.70 V |
| 1.8 psi | 7.19 V | 7.40 V |
| 2.0 psi | 7.67 V | 7.67 V |
| 2.2 psi | 8.16 V | 8.56 V |
| 2.4 psi | 8.64 V | 8.64 V |

จากผลการตอบสนองในภาพประกอบ 4-2 เราสามารถสรุปค่าแรงดันไฟฟ้าได้ตามตารางที่ 4-1 ดังนี้คือ แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากเครื่อง TEG กับแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการจำลองมีค่าใกล้เคียงกัน โดยที่ความดันก๊าซ 1.6 psi 2.0 psi และ 2.4 psi แรงดันที่วัดได้จากแบบจำลองและแรงดันที่วัดได้จากเครื่องจักรมีค่าเท่ากัน ที่ความดันก๊าซ 1.8 psi แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากเครื่องจักร

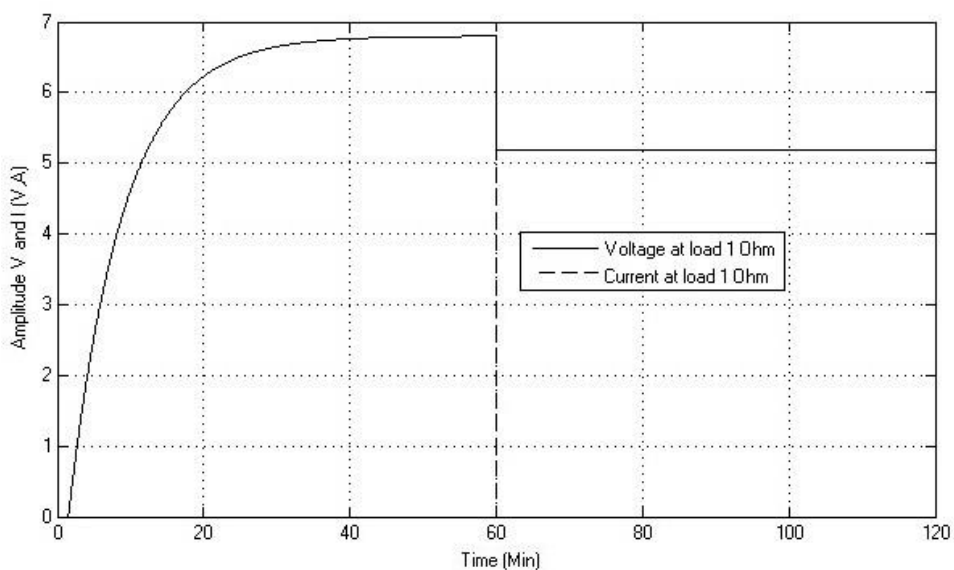
มีค่ามากกว่าแบบจำลอง 0.21 V และ ที่ความดันก๊าซ 2.2 psi แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากเครื่องจักรมีค่ามากกว่าแบบจำลอง 0.40 V ทั้งนี้ก็เพราะในการทำงานของเครื่องจักรแรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตเราทดสอบแบบวงเปิด หรือ Open circuit voltage โดยค่าแรงดันที่ได้สามารถเปลี่ยนแปลงได้เสมอเมื่ออุณหภูมิห้องหรืออุณหภูมิทางด้านร้อนและเย็นของ Thermopile มีการเปลี่ยนแปลงหรืออีกทางหนึ่ง ที่ส่งผลอย่างมากกับการเปลี่ยนแปลงแรงดันทางด้านเอาต์พุตคือ ค่าความต้านทานภายในของเครื่อง TEG โดยค่าความต้านทานภายในจะเปลี่ยนไปเมื่อเกิดการเพิ่มขึ้นหรือตกลงของอุณหภูมิภายในตัววัสดุชนิดเทอร์โมอิเล็กทริกอย่างรวดเร็ว ในกรณีนี้อาจเกิดจากอุณหภูมิห้องเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ในระหว่างทำการทดสอบที่ความดัน 1.8 psi และ 2.2 psi

ภาพประกอบ 4-3 แสดงแบบจำลองของเครื่องจักรเมื่อมีการต่อโหลดทางไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ $1\ \Omega$ $2\ \Omega$ $5\ \Omega$ และ $10\ \Omega$ ตามลำดับ จากนั้นเราจะทำการวัดค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ได้เปรียบเทียบกับระหว่างแบบจำลองและค่าที่วัดได้จากเครื่องจักร โดยวัตถุประสงค์ในการต่อโหลดเพื่อหาค่าแรงดันที่ตกลงเมื่อระบบ โดยรวมมีโหลดทางไฟฟ้า เพื่อให้สามารถคำนวณแรงดันเอาต์พุตสูงสุดและกระแสไฟฟ้าได้อย่างถูกต้อง

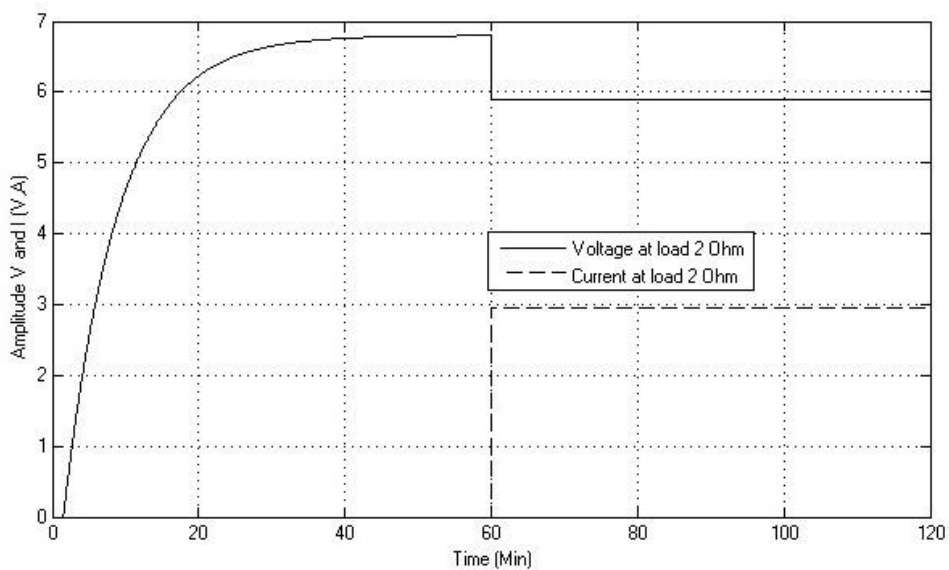


ภาพประกอบ 4-3 แบบจำลองทางไฟฟ้าเมื่อมีโหลด $1\ \Omega$ $2\ \Omega$ $5\ \Omega$ และ $10\ \Omega$

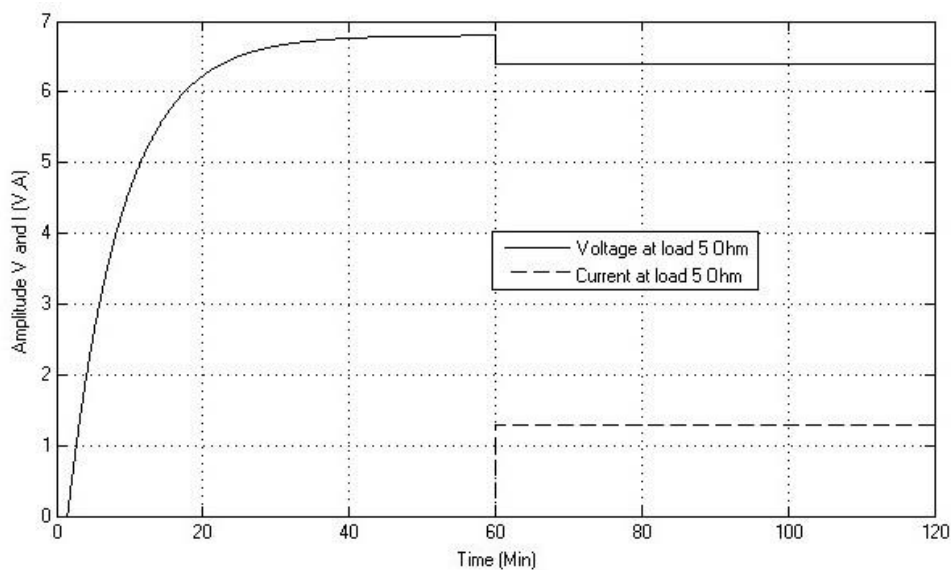
ภาพประกอบ 4-4 ถึงภาพประกอบ 4-7 แสดงผลตอบสนองที่ได้จากแบบจำลองเมื่อปรับความดันก๊าซ 1.6 psi และต่อโหลดทางไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ $1\ \Omega$ $2\ \Omega$ $5\ \Omega$ และ $10\ \Omega$ ตามลำดับ



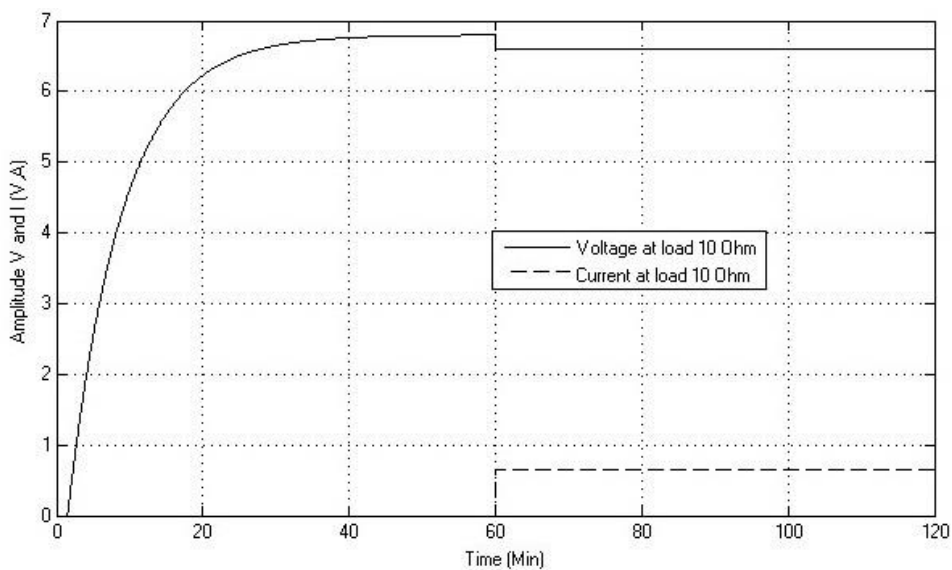
ภาพประกอบ 4-4 ผลตอบสนองที่ได้จากแบบจำลองเมื่อต่อโหลด 1 Ω



ภาพประกอบ 4-5 ผลตอบสนองที่ได้จากแบบจำลองเมื่อต่อโหลด 2 Ω



ภาพประกอบ 4-6 ผลตอบสนองที่ได้จากแบบจำลองเมื่อต่อโหลด 5 Ω



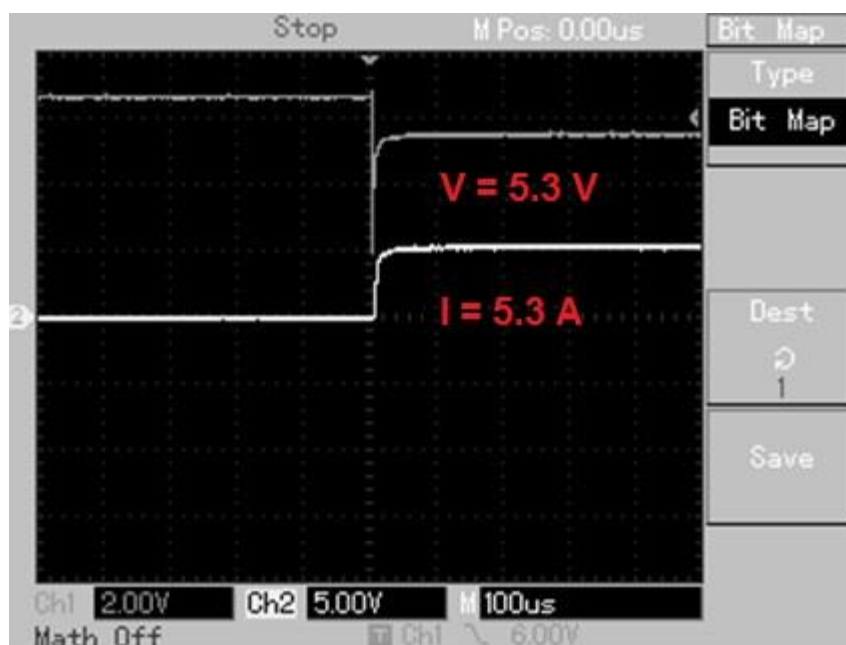
ภาพประกอบ 4-7 ผลตอบสนองที่ได้จากแบบจำลองเมื่อต่อโหลด 10 Ω

เมื่อเราได้ผลตอบสนองเมื่อต่อโหลดจากแบบจำลองแล้ว ต่อจากนี้เราทำการบันทึกค่าผลตอบสนองทั้งแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องจักร TEG โดยทำการเปิดวงจรทางด้านเอาต์พุตและต่อตัวต้านทาน มีค่า 1 Ω 2 Ω 5 Ω และ 10 Ω ทีละค่าตามลำดับ และทำการตั้งค่าเครื่องจักร TEG ตามภาพประกอบ 4-8

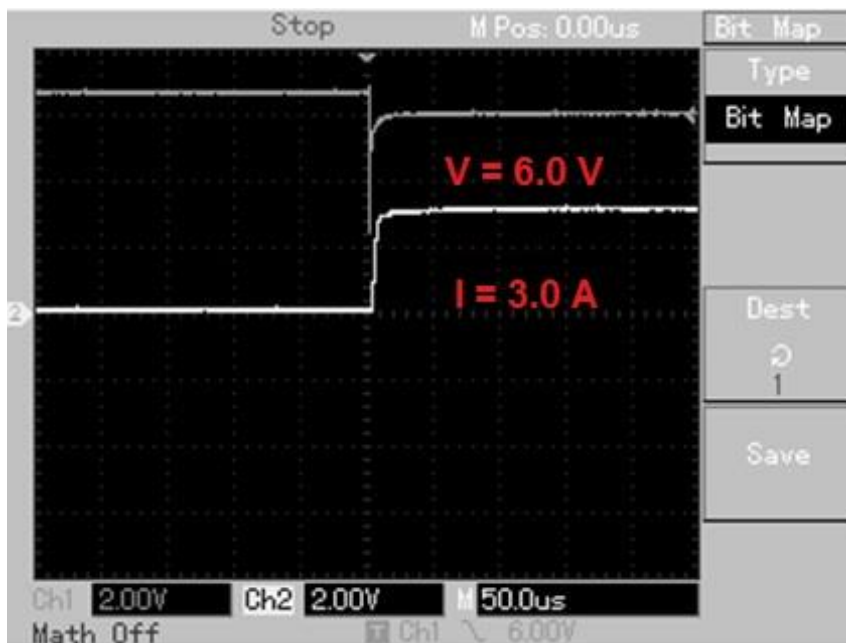


ภาพประกอบ 4-8 การติดตั้ง TEG และเครื่องมือวัดเพื่อทำการทดลอง

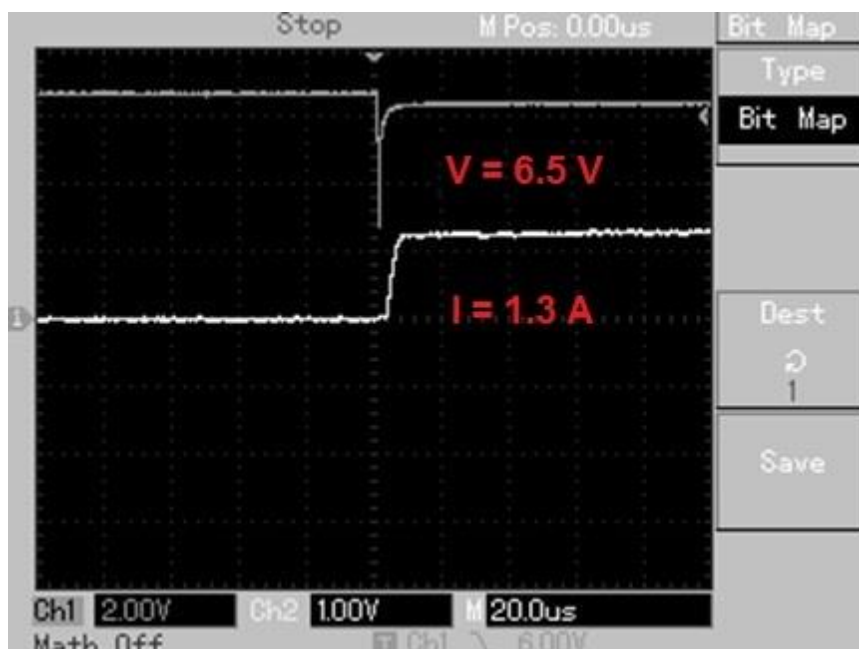
ภาพประกอบ 4-9 ถึง ภาพประกอบ 4-12 แสดงผลตอบสนองทั้งแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องจักร TEG โดยเราบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและกระแสไฟฟ้าที่ตกลงเมื่อเราเปิดใช้งาน โหลดที่ค่าต่างๆ และเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากแบบจำลอง



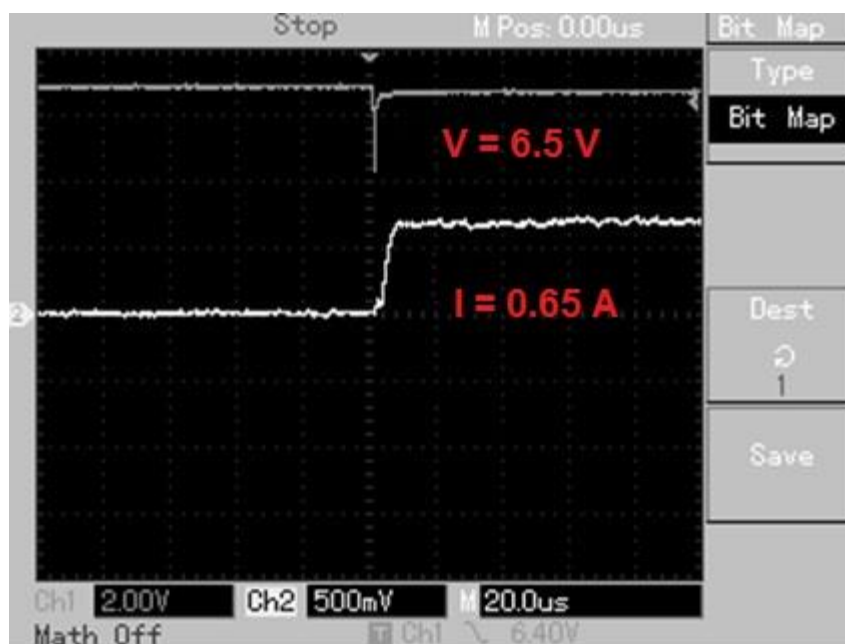
ภาพประกอบ 4-9 ผลตอบสนองที่ได้จากเครื่องจักรเมื่อต่อโหลดทางไฟฟ้า 1Ω



ภาพประกอบ 4-10 ผลตอบสนองที่ได้จากเครื่องจักรเมื่อต่อโหลดทางไฟฟ้า 2Ω



ภาพประกอบ 4-11 ผลตอบสนองที่ได้จากเครื่องจักรเมื่อต่อโหลดทางไฟฟ้า 5Ω



ภาพประกอบ 4-12 ผลตอบสนองที่ได้จากเครื่องจักรเมื่อต่อโหลดทางไฟฟ้า 10 Ω

ตาราง 4-2 เปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าระหว่างเครื่องจักรและแบบจำลองที่โหลดค่าต่างๆ

| Rload | Voltage (Machine) | Voltage (Model) | Current (Machine) | Current (Model) |
|-------|----------------------|--------------------|----------------------|--------------------|
| 1 Ω | 5.30 V | 5.19 V | 5.30 A | 5.19 A |
| 2 Ω | 6.00 V | 5.89 V | 3.00 A | 2.94 A |
| 5 Ω | 6.50 V | 6.40 V | 1.30 A | 1.28 A |
| 10 Ω | 6.50 V | 6.60 V | 0.65 A | 0.66 A |

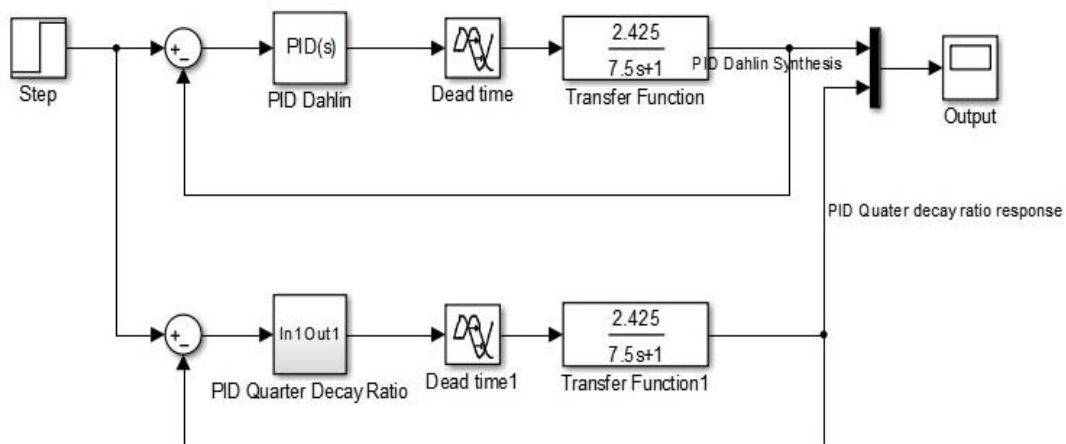
ตารางที่ 4-2 แสดงการเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่โหลดค่าต่างๆ ตั้งแต่ 1 Ω ถึง 10 Ω ค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ได้มาจากการบันทึกค่าจากเครื่องจักร TEG และค่าที่ได้จากแบบจำลอง (Model) การเปรียบเทียบทำให้ทราบถึงผลต่างของประสิทธิภาพการทำงานของแบบจำลองเมื่อเปรียบเทียบกับการทำงานของเครื่องจักร TEG

ตาราง 4-3 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกลงเมื่อต่อโหลดค่าต่างๆ

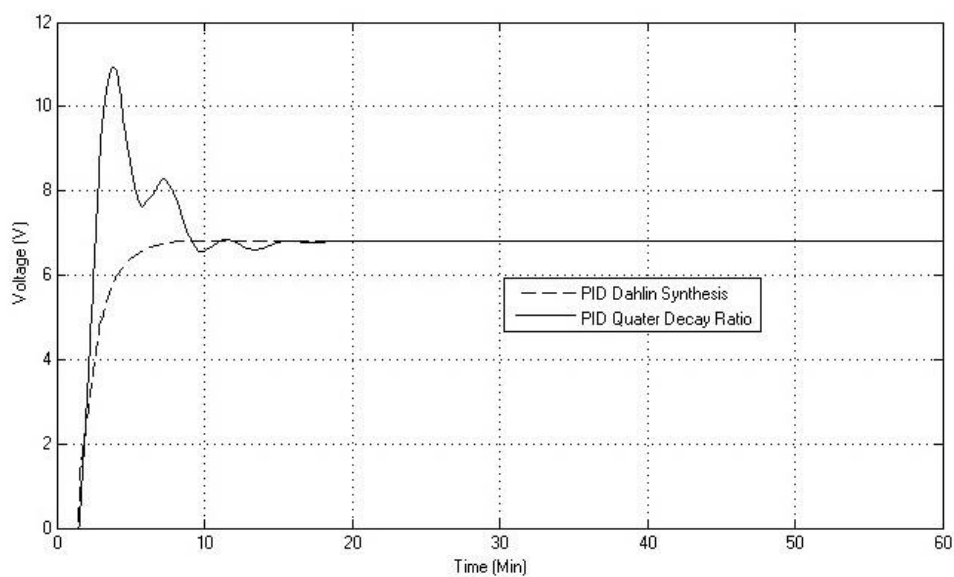
| Rload | Voltage (Machine) | Voltage (Model) |
|-------------|-------------------|-----------------|
| 1 Ω | 1.5 V | 1.61 V |
| 2 Ω | 0.8 V | 0.91 V |
| 5 Ω | 0.30 V | 0.40 V |
| 10 Ω | 0.30 V | 0.20 V |

เราทำการพิจารณาแรงดันตกคร่อมที่โหลดภายนอกทั้ง 4 ค่าตามตารางที่ 4-3 เราจะสังเกตได้ว่า แรงดันไฟฟ้าที่ตกลงเหล่านี้มีค่าค่อนข้างมากเมื่อเปรียบเทียบกับค่าแรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุต ดังนั้นเราจึงนำมาพิจารณาในการออกแบบเครื่อง TEG เหตุผลหลักที่ต้องศึกษาก็คือเพื่อทำการคำนวณแรงดันไฟฟ้าจริงที่เครื่อง TEG สามารถจ่ายให้กับโหลดภายนอกเพื่อที่จะสามารถคำนวณพลังงานในการใช้งานของเครื่อง TEG ได้อย่างถูกต้อง สาเหตุหลักที่เกิดแรงดันไฟฟ้าตกลง เมื่อต่อโหลดทางไฟฟ้าค่าต่างๆนั้น มาจากการที่เกิดค่าความต้านทานภายในเครื่อง TEG เอง เมื่อเราให้ TEG ทำงานในภาวะการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิโดยมีตัวแปรคือการเปลี่ยนแปลงค่าความดันก๊าซที่ค่าต่างๆ ทำให้ Thermopile หรือวัสดุ TE เกิดการทำงานในสภาวะ Dynamic ทำให้ค่าความร้อนมีการเปลี่ยนแปลงเมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงก็ทำให้ค่าความต้านทานภายในเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย เมื่อมีค่าความต้านทานภายในเกิดขึ้นก็ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าค่าหนึ่งตกคร่อมที่ค่าความต้านทานตัวนั้นด้วย

จากนั้นเราทำการออกแบบการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของระบบโดยใช้ตัวควบคุมแบบ PID ที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 โดยเป็นรูปแบบตัวควบคุมดิจิทัลและค่าพารามิเตอร์ต่างๆยังคงใช้งานเหมือนเดิมที่กล่าวไว้ในตารางที่ 3-4 ซึ่งในการจำลองการทำงานเราจะพิจารณาในส่วนของผลตอบสนองของระบบเปรียบเทียบกับเวลาของตัวควบคุมแบบ Dahlin synthesis และ Quarter decay ratio โดยเราจะพิจารณาเลือกตัวควบคุมที่มีผลตอบสนองที่รวดเร็วและมีค่าฟุงเกินไม่เกิน 5% ของค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุด



ภาพประกอบ 4-13 แบบจำลองเมื่อต่อตัวควบคุมแบบ Dahlin และ Quarter decay ratio



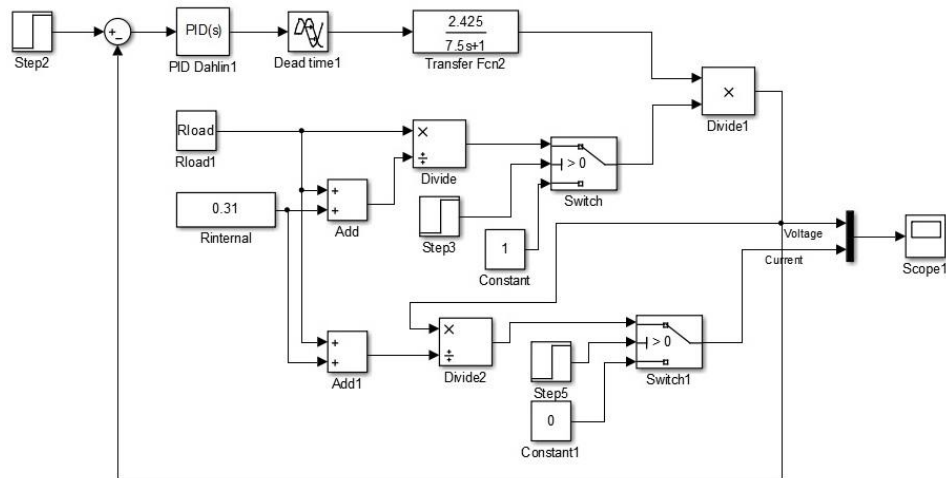
ภาพประกอบ 4-14 ผลการตอบสนองของระบบ ที่มีรูปแบบการควบคุม Dahlin synthesis
เปรียบเทียบกับรูปแบบการควบคุม Quarter decay ratio

ภาพประกอบ 4-14 เราทำการพิจารณาเวลาที่ระบบควบคุมทั้งสองชนิดจะเข้าสู่สถานะเสถียร ระบบควบคุมแบบ Dahlin synthesis สามารถเข้าสู่สถานะเสถียรได้ช้ากว่าระบบควบคุมแบบ Quarter decay ratio โดยระบบควบคุมแบบ Dahlin synthesis จะเข้าสู่สถานะเสถียรที่เวลา 10 นาที ในขณะที่ระบบการควบคุมแบบ Quarter decay ratio จะเข้าสู่สถานะเสถียรที่เวลา 15 นาที แต่ระบบควบคุมแบบ Quarter decay ratio มีค่าพุ่งเกินถึง 57% ในขณะที่ระบบการควบคุมแบบ Dahlin synthesis ไม่มีค่าพุ่งเกิน ซึ่งในการใช้งานจริง อ้างอิงจาก Datasheet ของเครื่อง TEG ระบบค่าพุ่งเกินของแรงดันไฟฟ้าได้ไม่เกิน 25% ของค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุด จากกราฟผลตอบแทนค่าพารามิเตอร์ช่วงเวลาขาขึ้น (Rise time) ช่วงเวลาสูงสุด (Peak time) และ ช่วงเวลาสู่จุดสมดุล (Settling time) แสดงดังตารางที่ 4-4

ตาราง 4-4 ผลตอบสนองทางเวลาของแบบจำลองเมื่อต่อใช้งานระบบควบคุม Dahlin Synthesis และ Quarter decay ratio

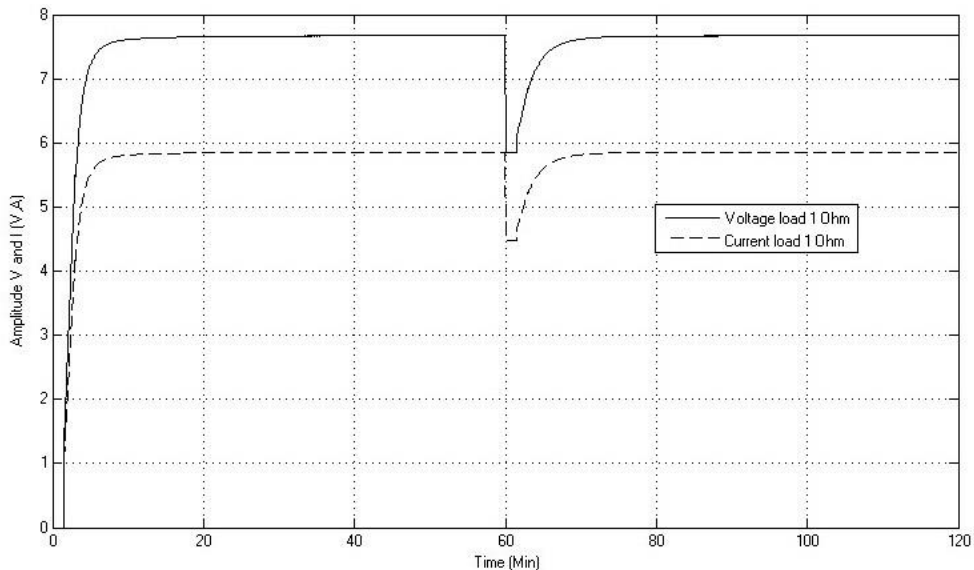
| Parameter | Quarter decay ratio | Dahlin synthesis |
|---------------|---------------------|------------------|
| Rise time | 2 min | 8 min |
| Peak time | 5 min | - |
| Settling time | 15 min | 10 min |

จากภาพประกอบ 4-15 แสดงแบบจำลองของเครื่องจักรเมื่อมีการต่อโหลดทางไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 1Ω 2Ω 5Ω และ 10Ω ตามลำดับ และต่อใช้งานควบคู่กับระบบควบคุม Dahlin synthesis เราจะพิจารณาค่าแรงดันสูงสุด ค่ากระแสไฟฟ้า และเวลาเริ่มต้นเมื่อระบบมีการตกลงของแรงดันไฟฟ้าจนถึงเวลาที่ระบบมีการตอบสนองจากตัวควบคุมเพื่อทำให้ระบบกลับมาสู่ภาวะการทำงานแบบปกติ เพื่อสามารถนำไปคำนวณค่าเวลาที่ต้องใช้ในการกู้คืนสภาพของแรงดันไฟฟ้า

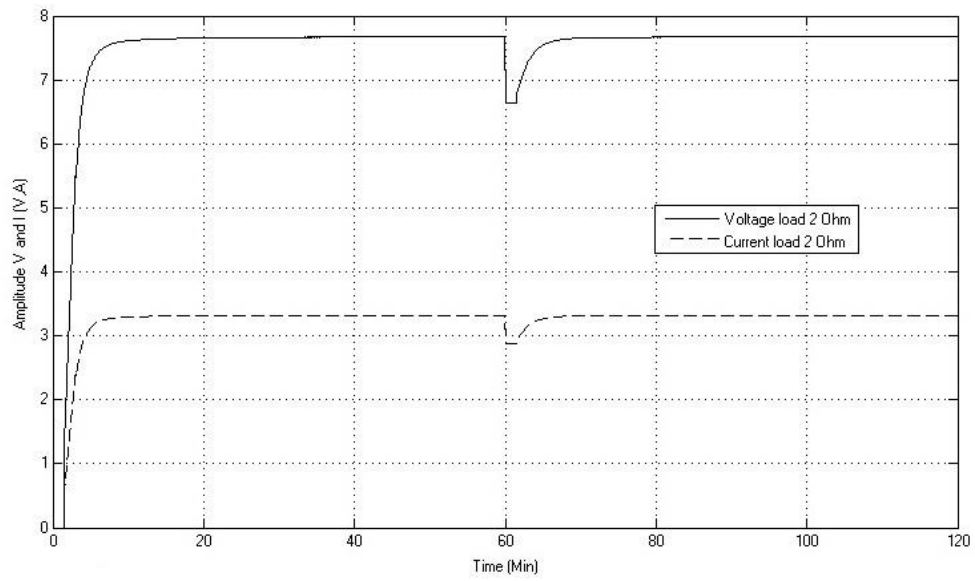


ภาพประกอบ 4-15 บล็อกไดอะแกรมของระบบที่มีการใช้การควบคุม Dahlin Synthesis และต่อโหลดทางไฟฟ้า

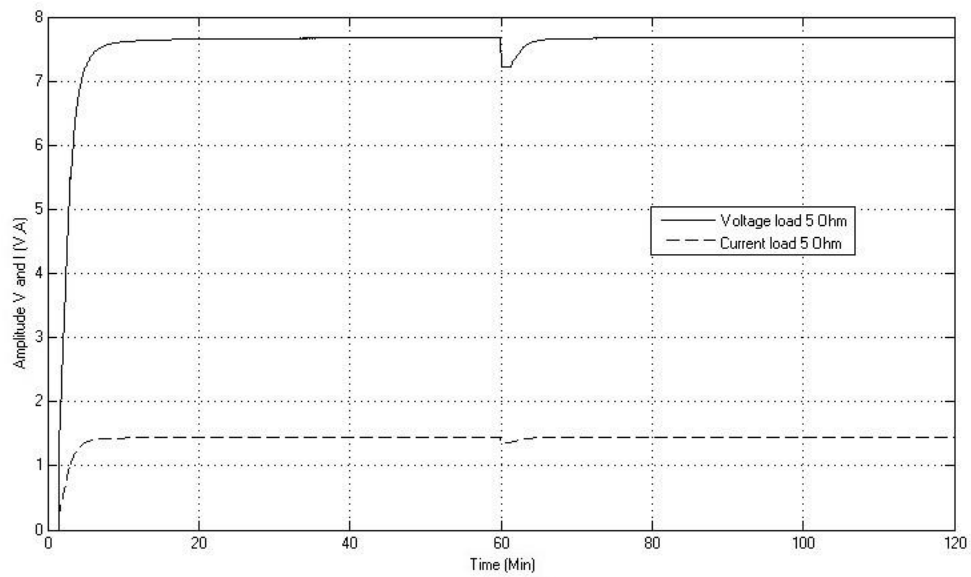
ภาพประกอบ 4-16 ถึง ภาพประกอบ 4-19 แสดงผลตอบสนองของแบบจำลองโดยใช้ตัวควบคุมแบบ Dahlin synthesis เมื่อต่อโหลดทางไฟฟ้าค่าต่างๆตั้งแต่ 1Ω ถึง 10Ω โดยตั้งค่าแรงดัน Set point ที่ 7.6 V และทำการเปิดใช้งานโหลดภายนอกเมื่อระบบทำงานครบ 60 นาที



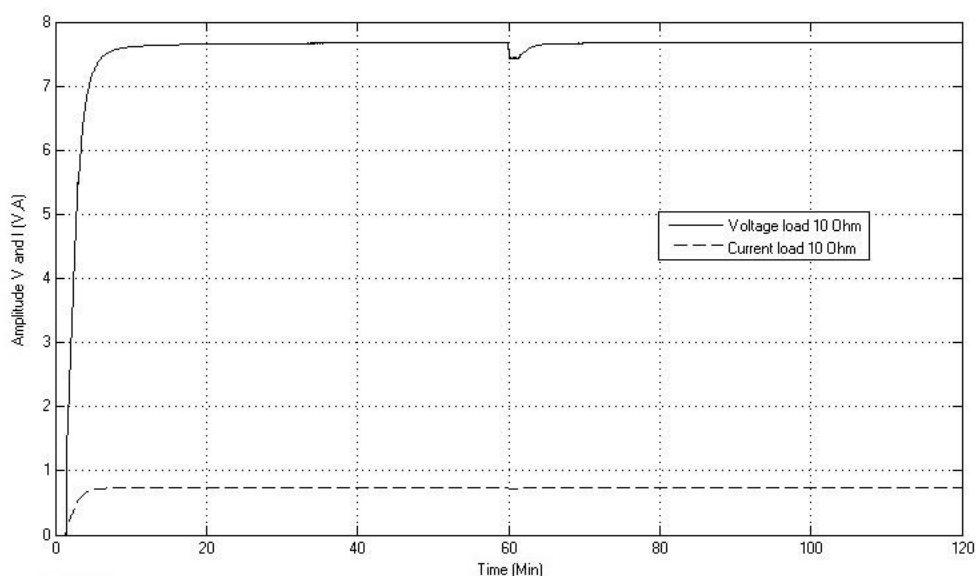
ภาพประกอบ 4-16 ผลตอบสนองที่ได้จากระบบ Dahlin synthesis เมื่อต่อโหลดทางไฟฟ้า 1Ω



ภาพประกอบ 4-17 ผลตอบสนองที่ได้จากระบบ Dahlin synthesis เมื่อต่อโหลดทางไฟฟ้า 2 Ω



ภาพประกอบ 4-18 ผลตอบสนองที่ได้จากระบบ Dahlin synthesis เมื่อต่อโหลดทางไฟฟ้า 5 Ω



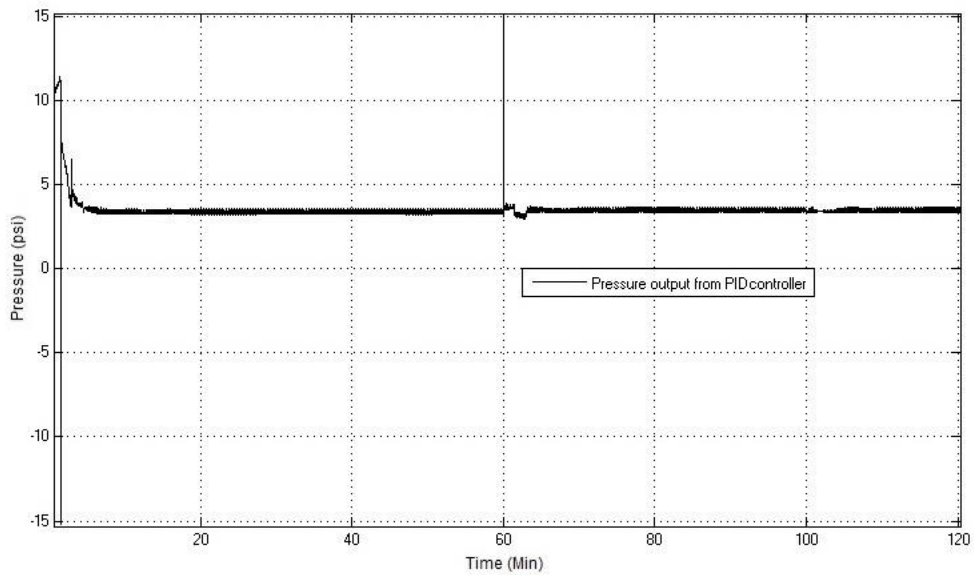
ภาพประกอบ 4-19 ผลตอบสนองที่ได้จากระบบ Dahlin synthesis เมื่อต่อโหลดทางไฟฟ้า 10 Ω

ผลตอบสนองที่ได้จากแบบจำลองเมื่อระบบควบคุมอัตโนมัติแบบ Dahlin synthesis ทำงานควบคู่กับการต่อโหลดทางไฟฟ้า พบว่าทุกผลตอบสนองมีการลดลงของค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า ทั้งนี้เนื่องมาจากโหลดภายในของแบบจำลอง TEG ถูกเปิดใช้งานควบคู่กับโหลดภายนอก ในนาที่ที่ 60 ของทุกผลการทดลอง ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ลดลงจะมีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมโหลดภายในเมื่อเราทำการเปิดใช้งานที่โหลดภายนอกค่าต่างๆ ส่วนกระแสไฟฟ้าที่ลดลงเพราะเมื่อแรงดัน TEG เปลี่ยนไป จากกฎของโอห์ม ค่าของกระแสไฟฟ้าก็จะเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย จากค่าของโหลดภายนอกที่แตกต่างกัน ทำให้ค่าแรงดันเอาท์พุทที่ตกคร่อมตัวต้านทานมีค่าที่ไม่เท่ากัน จากนั้นเราทำการพิจารณาค่าเวลาที่ระบบทำการกู้คืนสภาพของแรงดันและกระแสไฟฟ้า ในการทำงานที่ไม่มีภาระโหลด ระบบควบคุมอัตโนมัติแบบ Dahlin synthesis ใช้เวลาในการเข้าสู่ภาวะเสถียรประมาณ 10 นาที่ – 15 นาที่ เมื่อเราพิจารณาที่ผลตอบสนองที่โหลดทางไฟฟ้าค่าต่างๆ พบว่าระบบพยายามที่จะทำให้ผลตอบสนองเข้าสู่ภาวะเสถียรอย่างรวดเร็วที่สุด โดยไม่มีค่าพุ่งเกินของแรงดัน โดยระยะเวลาที่ใช้จะขึ้นอยู่กับความสามารถของตัวควบคุมและค่าของโหลดภายนอกค่าต่างๆ โดยค่าที่เราทำการพิจารณาแสดงดังตารางที่ 4-5

ตาราง 4-5 ผลตอบสนองของแรงดันและกระแสที่ตกลง เมื่อใช้งานตัวควบคุม Dahlin synthesis
ควบคู่กับโหลดภายนอกค่าต่างๆ

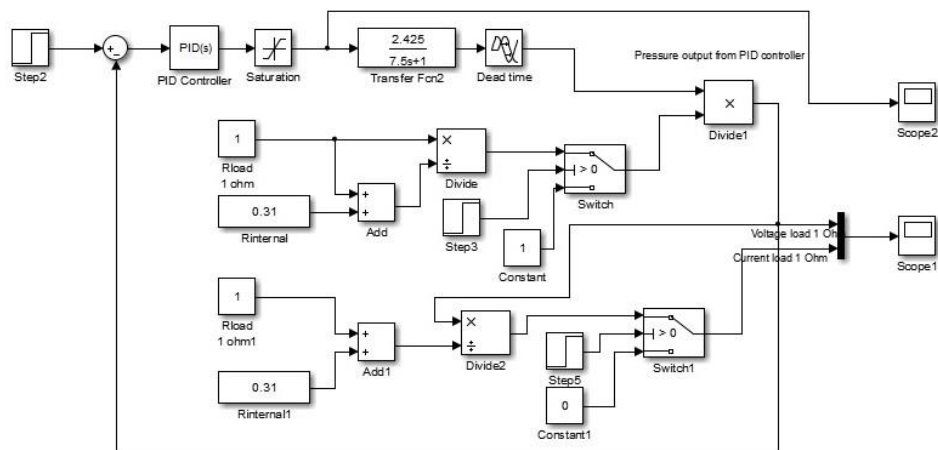
| Rload (Ohm) | Voltage drop (Volt) | Current drop (Amp) | Recovery time (Min) |
|-------------|---------------------|--------------------|---------------------|
| 1 Ω | 1.82 V | 1.39 A | 13 min |
| 2 Ω | 1.03 V | 0.45 A | 24 min |
| 5 Ω | 0.45 V | 0.08 A | 30 min |
| 10 Ω | 0.23 V | 0.02 A | 35 min |

หลังจากเราพิจารณาเสถียรภาพของระบบเมื่อให้ระบบโดยรวมทำงานควบคู่กับ โหลดและตัวควบคุม จากนั้นเราต้องการพิจารณาผลตอบสนองของความดันก๊าซเมื่อเราตั้งค่า แรงดันไฟฟ้าใช้งานที่ 7.67 V ภาพประกอบ 4-20 แสดงผลตอบสนองของความดันก๊าซ เปรียบเทียบกับเวลาของระบบเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบ Dahlin synthesis ในสถานะที่ต่อโหลดทาง ไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 1 Ω โดยความดันก๊าซพุ่งขึ้นสูงสุดที่ 12 psi เมื่อตัวควบคุม PID เริ่มทำงาน จากนั้นลดลงต่ำสุดที่ -15 psi และเข้าสู่สภาวะการทำงานปกติ โดยที่ตัวควบคุมพยายามทำให้ แรงดันไฟฟ้าสูงสุดอยู่เข้าสู่ค่าที่ต้องการ และหลังจากแรงดันไฟฟ้าถึงระดับคงที่แล้วคือ 7.67 V ค่าความดันก๊าซมีค่าประมาณ 3.12 psi จากนั้นระบบยังคงสถานะคงที่ แรงดันไฟฟ้าเท่าเดิมตลอด ช่วงการใช้งานของแบบจำลอง TEG

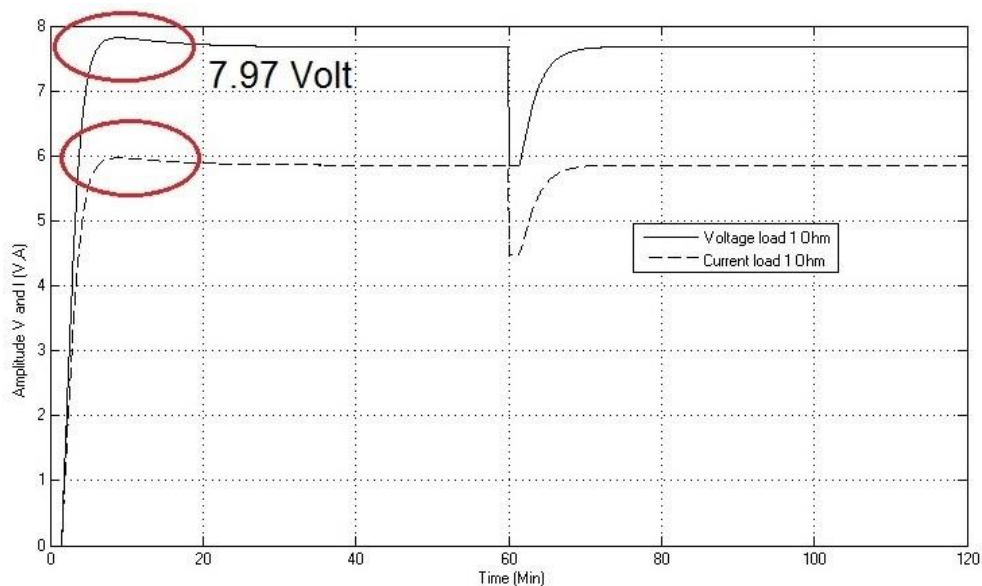


ภาพประกอบ 4-20 ผลตอบสนองของความดันก๊าซเปรียบเทียบกับเวลาของระบบเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบ Dahlin synthesis โดยกำหนดค่าแรงดันเอาต์พุตเท่ากับ 7.67 V

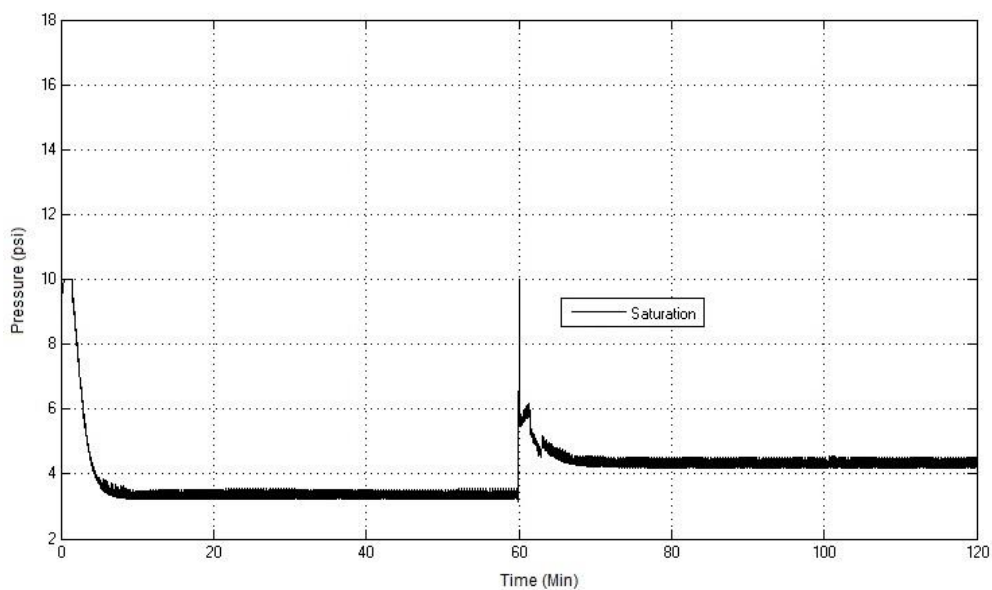
ปัญหาที่เกิดขึ้นหลังจากที่เราทำการพิจารณาผลตอบสนองของความดันก๊าซ คือ เราพบความดันก๊าซซึ่งมีค่าติดลบในช่วงที่ PID ทำงาน ดังนั้นเราจึงทำการพิจารณาติดตั้ง Saturation block ใน Simulink เพื่อทำการจำกัดแรงดันก๊าซเฉพาะค่าทางด้านบวกคือ ให้ระบบทำงานที่ 0-10 psi เมื่อระบบถูกจำกัดความดันก๊าซแสดงตามภาพประกอบ 4-21 และผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ได้จากบล็อกไดอะแกรมแสดงตามภาพประกอบ 4-22



ภาพประกอบ 4-21 บล็อกไดอะแกรมของ Dahlin synthesis ทำงานควบคู่กับโหลดทางไฟฟ้า โดยตั้งค่าจำกัดความดันก๊าซที่ 10 psi



ภาพประกอบ 4-22 ผลตอบสนองของ Dahlin synthesis ทำงานควบคู่กับโหลดทางไฟฟ้า โดยตั้งค่าจำกัดความดันก๊าซที่ 10 psi

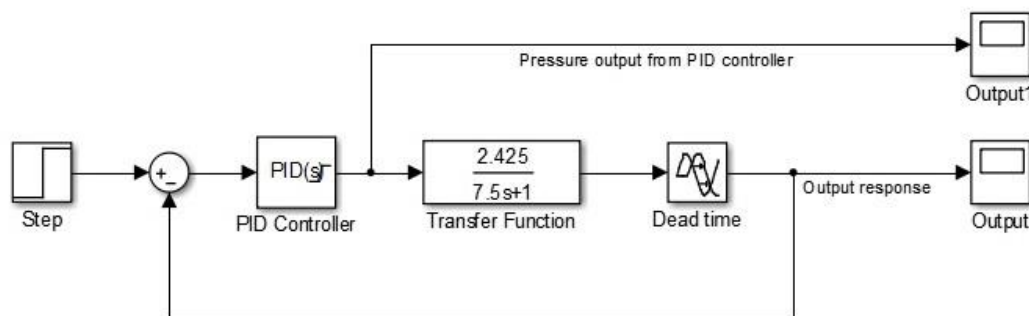


ภาพประกอบ 4-23 ผลตอบสนองของความดันก๊าซเปรียบเทียบกับเวลาของระบบเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบ Dahlin synthesis โดยกำหนดจำกัดความดันก๊าซที่ 10 psi

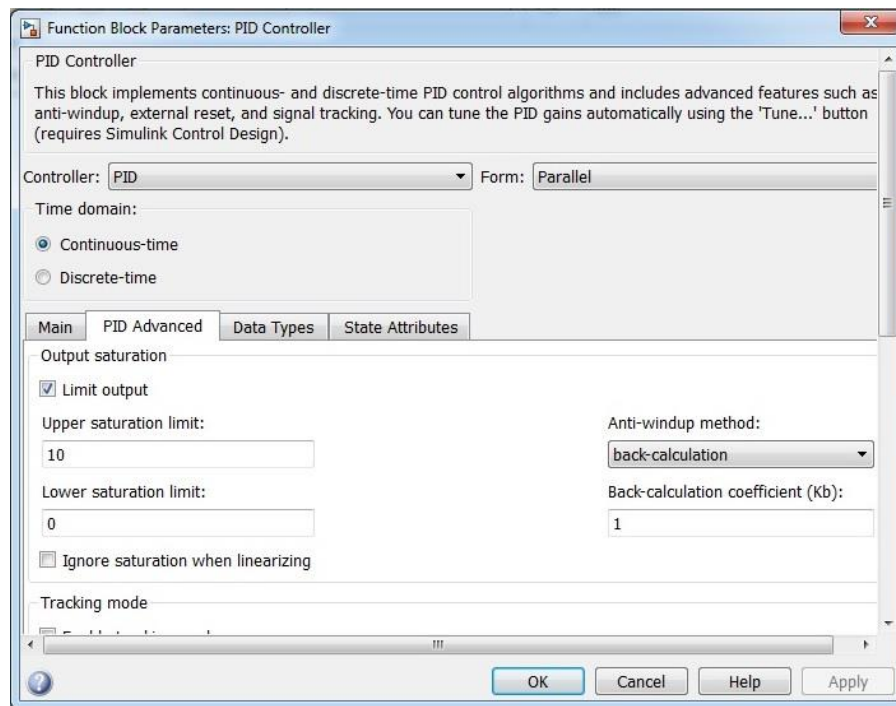
เมื่อเราทำการจำกัดความดันก๊าซไว้ที่ 10 psi เรียบร้อยแล้ว เราทำการพิจารณาผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า ควบคู่กับผลตอบสนองของความดันก๊าซที่ได้จาก

บล็อกไดอะแกรม จากผลตอบสนองทางแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของระบบเมื่อทำการจำกัดความดันก๊าซที่ออกจากตัวควบคุม PID จะทำให้เกิดการพุ่งเกิน (Overshoot) ของแรงดันไฟฟ้า สถานการณ์ที่เราเรียกว่า การเกิดอินทิกรัลไวด์อัป (Integral windup) ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงอย่างมากที่เกิดขึ้นกับค่า Setpoint โดยการอินทิเกรตค่าผิดพลาดสะสมในช่วงที่ PID เริ่มทำงาน ซึ่งผลของการเกิด windup จะทำให้เกิดค่าพุ่งเกินของแรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตและทำให้ระบบไม่สามารถเข้าสู่ค่า Setpoint ได้ ในขณะเดียวกันเมื่อเราพิจารณาผลตอบสนองของความดันก๊าซ จากภาพประกอบ 4-23 ในขั้นตอนนี้ไม่เกิดการลดลงของความดันก๊าซจนมีค่าเป็นลบ เพราะเราทำการตั้งค่าใช้งานที่ 0-10 psi

จากนั้นเราพิจารณาทำการปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบด้วยการลดผลที่เกิดจากการ windup หรือที่เราเรียกว่า การทำ Anti-windup โดยลักษณะการทำงานของ Anti-windup คือการ Reset ค่า Integral เมื่อระบบให้เอาต์พุตที่มีค่าเกินกว่า Setpoint โดยในขั้นแรกเราทำการ Tuning ระบบของเราในสถานะไม่ต่อโหลดทางไฟฟ้า ตามภาพประกอบ 4-24 และแสดงการตั้งค่า บล็อกไดอะแกรมของ PID เพื่อจำกัดแรงดันก๊าซใช้งานรวมทั้งเลือกวิธีการของ Anti-windup ตามภาพประกอบ 4-25



ภาพประกอบ 4-24 บล็อกไดอะแกรมของ Dahlin synthesis โดยตั้งค่า Anti-windup ใน PID บล็อกไดอะแกรม

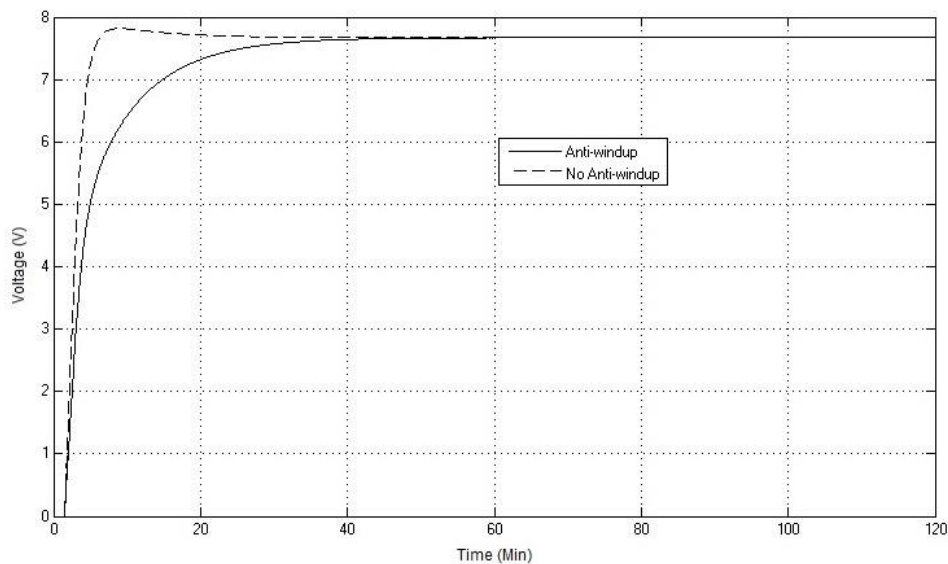


ภาพประกอบ 4-25 การตั้งค่า Anti-windup ใน PID บล็อกไคอะแกรม

การตั้งค่า Anti-windup เพื่อป้องกันการเกิดอินทิกรัลไวต์ออฟ เราใช้บล็อกไคอะแกรม PID ใน Simulink ที่มีตัวช่วยอยู่ 2 แบบด้วยกันคือ แบบ back-calculation และ แบบ clamping โดยทั้งสองแบบเป็นวิธีการของ Tracking mode การตั้งค่าเริ่มจากการใช้ Function block parameter เพื่อตั้งค่า PID Advance control โดยตั้งค่า Output saturation เท่ากับค่าแรงดันสูงสุดที่ระบบยอมรับให้สามารถทำงานได้ จากนั้นทำการตั้งค่า Anti-windup method เราสามารถตั้งค่าได้ 2 แบบคือ แบบ back-calculation และแบบ clamping ในที่นี้เราเลือกใช้วิธี back-calculation การทำงานของ back-calculation ทำได้โดยการใช้การป้อนกลับเพื่อคิซซาร์จตัวอินทิเกรเตอร์ภายในเมื่อตัวควบคุม PID ถึงจุด Saturation และจากนั้นก็ให้ตัวควบคุมเข้าสู่ทำงานในสภาวะ Non-linear จากนั้นกำหนดค่าอัตราขยาย K_b เพื่อกำหนดค่า Time constant ของ Anti-windup loop

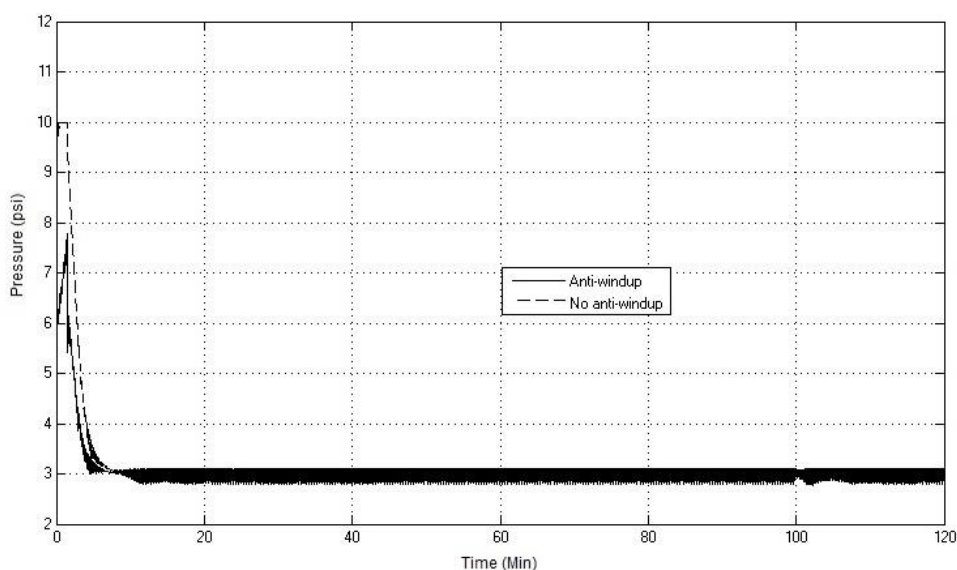
ภาพประกอบ 4-26 แสดงผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเมื่อเราใช้วิธีการ Anti-windup โดยการตั้งค่า Setpoint ที่ 7.67 V และให้จำกัดความดันก๊าซที่ 10 psi จากผลตอบสนองเราไม่พบค่าพุ่งเกินของแรงดันไฟฟ้าแต่เวลาที่เข้าสู่ Steady state มีค่าเพิ่มขึ้น อันเนื่องมาจากระบบต้องใช้เวลานานขึ้นในการคำนวณค่า Integral และ Reset ค่า Integral เมื่อเกิดค่า Error เกินกว่า Setpoint ที่เรากำหนด

เราทำการเปรียบเทียบผลตอบสนองของแบบจำลองใน MATLAB ระหว่างระบบที่ใช้ Anti-windup และระบบที่ไม่มีการใช้ Anti-windup ในสถานะ No load



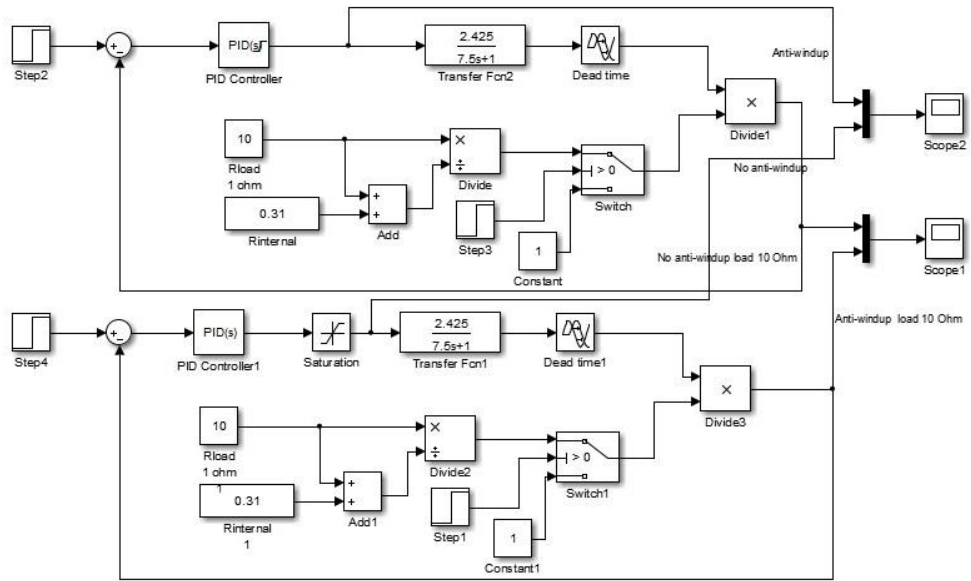
ภาพประกอบ 4-26 ผลตอบสนองแรงดันไฟฟ้าของระบบที่มีการใช้ Anti-windup และระบบที่ไม่มีการใช้ Anti-windup โดยไม่ต่อโหลดทางไฟฟ้า

เราจะเห็นว่าไม่มีการเกิดขึ้นของค่าพุ่งเกินของแรงดันในระบบที่ใช้ Anti-windup แต่ระบบที่ใช้ Anti-windup จะมีค่า Rise time และ Settling time เพิ่มมากขึ้นกว่าเดิม 5-10 นาที แต่ทั้งสองระบบมีเวลาในการเข้าสู่ Peak value หรือ Setpoint value เท่ากันคือ 55 นาที

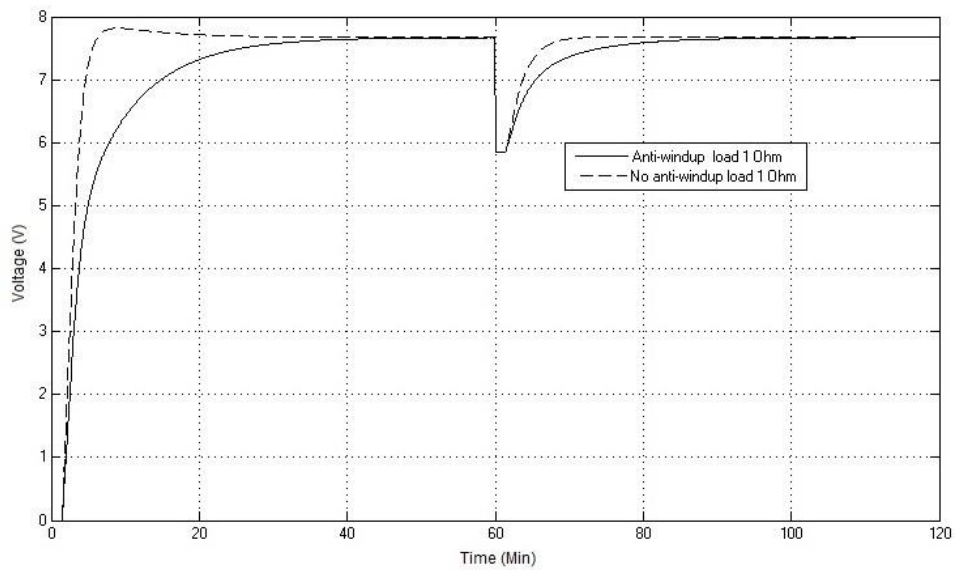


ภาพประกอบ 4-27 ผลตอบสนองความดันก๊าซของระบบที่มีการใช้ Anti-windup และระบบที่ไม่มีการใช้ Anti-windup โดยไม่ต่อโหลดทางไฟฟ้า

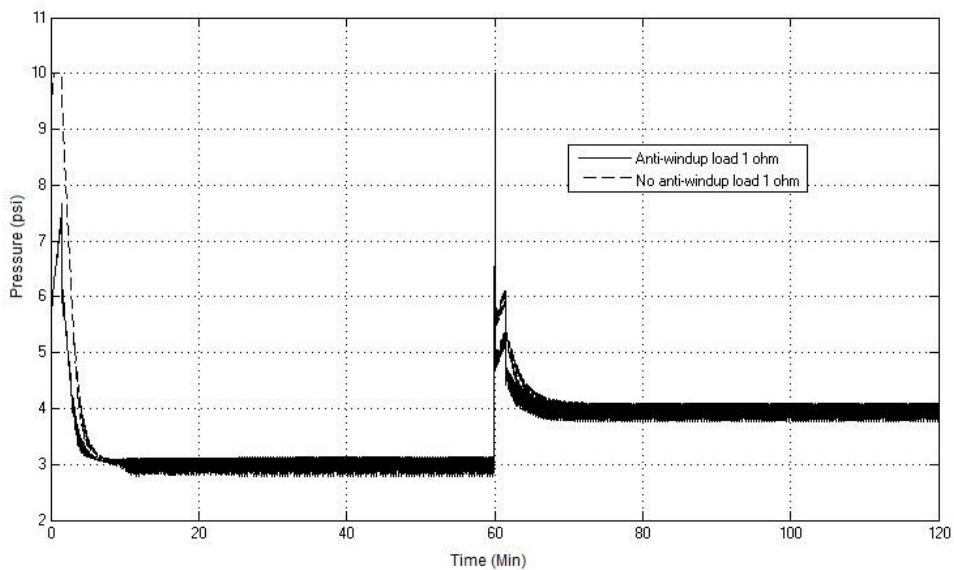
ในลำดับต่อมาเราพิจารณาผลตอบสนองของความดันก๊าซของระบบที่ใช้ Anti-windup และระบบที่ไม่มีการใช้ Anti-windup ความดันก๊าซสูงสุดของระบบที่มีการใช้ Anti-windup อยู่ที่ 7.6 psi แต่ระบบที่ไม่มีการใช้ Anti-windup มีค่าพุ่งเกินกว่าค่า Saturation คือ 10 psi และเมื่อ PID เริ่มทำงานความดันก๊าซของทั้งสองระบบจากค่อยๆลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากระบบเริ่มเข้าสู่สถานะ Steady state จากนั้นความดันก๊าซของที่มีค่าประมาณ 3.1 psi ทั้งนี้เนื่องมาจากระบบเข้าสู่ Setpoint จากนั้นเรานำค่าพารามิเตอร์ต่างๆของบล็อก PID เพื่อนำไปใช้กับระบบโดยรวมซึ่งมีการต่อใช้งาน โหลดทางไฟฟ้า และพิจารณาผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเปรียบเทียบกับกันระหว่างระบบที่มี Anti-windup และระบบที่ไม่มีการตั้งค่า Anti-windup



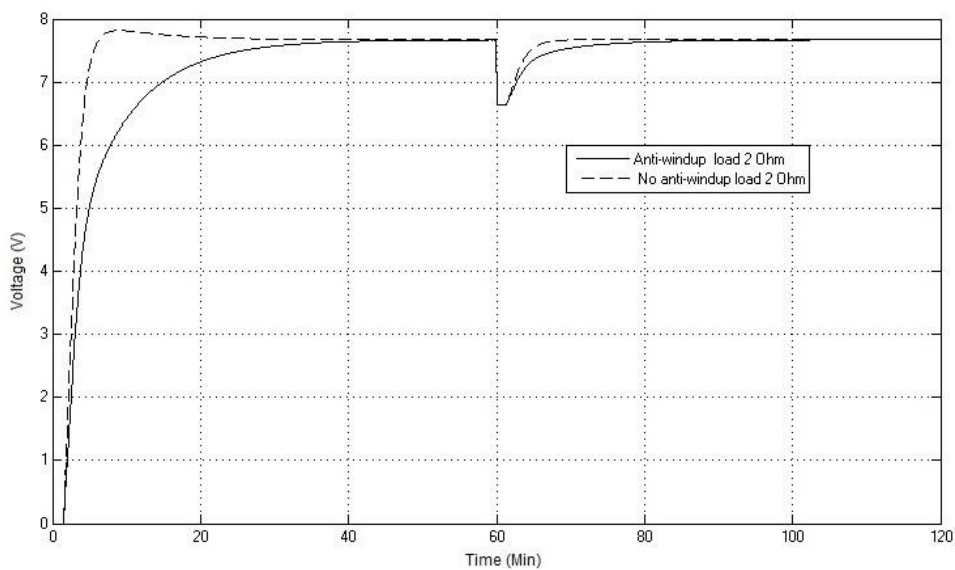
ภาพประกอบ 4-28 บล็อกไดอะแกรมของระบบที่มีการใช้ Anti-windup และไม่มีการใช้ Anti-windup เมื่อต่อโหลดทางไฟฟ้า



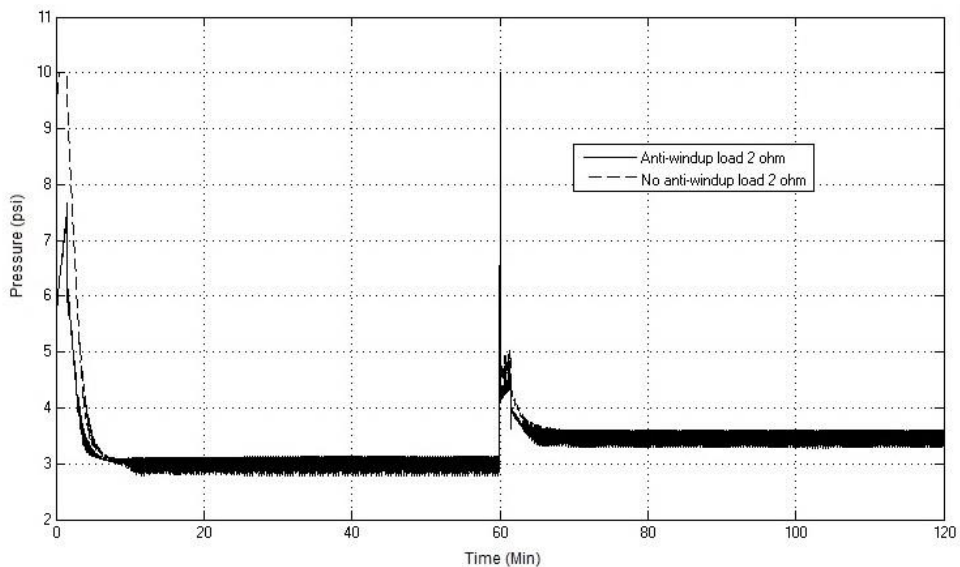
ภาพประกอบ 4-29 ผลตอบสนองแรงดันไฟฟ้าของระบบที่มีการใช้ Anti-windup และไม่มีการใช้ Anti-windup เมื่อต่อโหลดทางไฟฟ้า 1 Ω



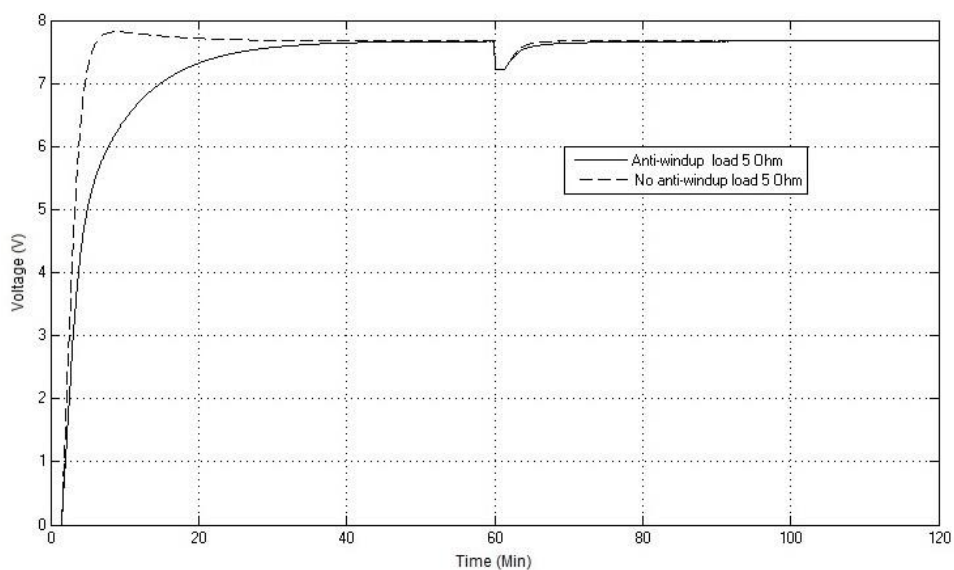
ภาพประกอบ 4-30 ผลตอบสนองความดันก๊าซของระบบที่มีการใช้ Anti-windup และไม่มีการใช้ Anti-windup เมื่อต่อโหลดทางไฟฟ้า 1 Ω



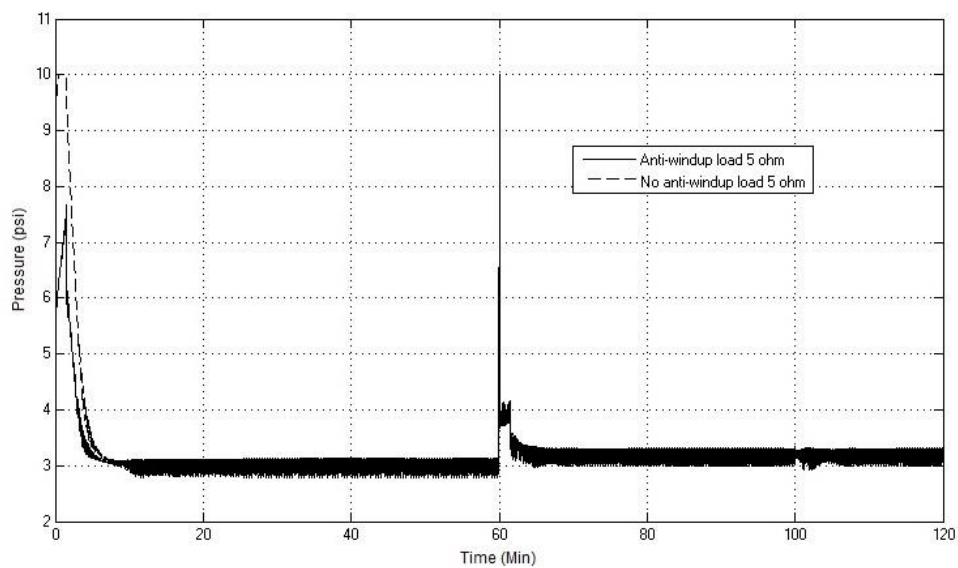
ภาพประกอบ 4-31 ผลตอบสนองแรงดันไฟฟ้าของระบบที่มีการใช้ Anti-windup และไม่มีการใช้ Anti-windup เมื่อต่อโหลดทางไฟฟ้า 2 Ω



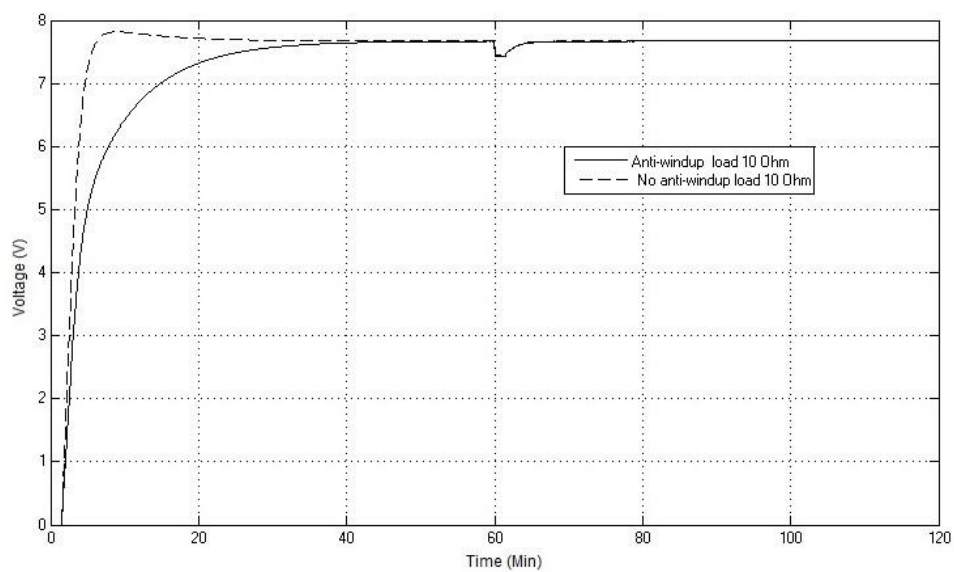
ภาพประกอบ 4-32 ผลตอบสนองความดันก๊าซของระบบที่มีการใช้ Anti-windup และไม่มีการใช้ Anti-windup เมื่อต่อ โหลดทางไฟฟ้า 2 Ω



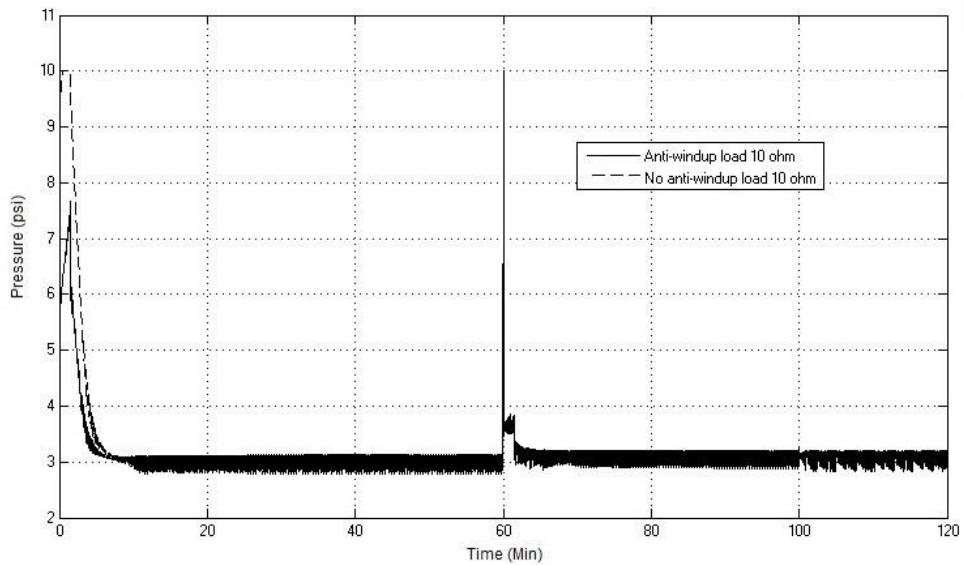
ภาพประกอบ 4-33 ผลตอบสนองแรงดันไฟฟ้าของระบบที่มีการใช้ Anti-windup และไม่มีการใช้ Anti-windup เมื่อต่อ โหลดทางไฟฟ้า 5 Ω



ภาพประกอบ 4-34 ผลตอบสนองความดันก๊าซของระบบที่มีการใช้ Anti-windup และไม่มีการใช้ Anti-windup เมื่อต่อโหลดทางไฟฟ้า 5 Ω



ภาพประกอบ 4-35 ผลตอบสนองแรงดันไฟฟ้าของระบบที่มีการใช้ Anti-windup และไม่มีการใช้ Anti-windup เมื่อต่อโหลดทางไฟฟ้า 10 Ω



ภาพประกอบ 4-36 ผลตอบสนองของความดันก๊าซของระบบที่มีการใช้ Anti-windup
และไม่มีการใช้ Anti-windup เมื่อต่อโหลดทางไฟฟ้า 10 Ω

จากผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าและผลตอบสนองของความดันก๊าซที่ได้จาก
บล็อกไดอะแกรมของระบบที่มีการใช้งาน Anti-windup เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับระบบที่ไม่มี
การใช้ Anti-windup แสดงในตาราง 4-6

ตาราง 4-6 เปรียบเทียบผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของระบบที่มีการใช้งาน
Anti-windup และไม่มีการใช้ Anti-windup

| Rload (Ohm) | Rise time | | Peak time | | Settling time | | Peak value | |
|----------------|-----------------|--------------------|-----------------|--------------------|-----------------|--------------------|-----------------|--------------------|
| | Anti- windup | No anti- windup | Anti- windup | No anti- windup | Anti- windup | No anti- windup | Anti- windup | No anti- windup |
| 1 Ω | 40 min | 6 min | 55 min | 10 min | 50 min | 25 min | 7.67 V | 7.82 V |
| 2 Ω | 40 min | 6 min | 55 min | 8 min | 50 min | 30 min | 7.67 V | 7.82 V |
| 5 Ω | 40 min | 6 min | 55 min | 8 min | 50 min | 30 min | 7.67 V | 7.81 V |
| 10 Ω | 40 min | 6 min | 55 min | 8 min | 50 min | 30 min | 7.67 V | 7.81 V |

ตาราง 4-7 เปรียบเทียบผลตอบสนองของความดันก๊าซของระบบที่มีการใช้งาน Anti-windup และ
ไม่มีการใช้ Anti-windup

| Rload (Ohm) | Peak pressure | |
|-------------|---------------|----------------|
| | Anti-windup | No anti-windup |
| 1 Ω | 7.66 psi | 10 psi |
| 2 Ω | 7.66 psi | 10 psi |
| 5 Ω | 7.6 psi | 10 psi |
| 10 Ω | 7.6 psi | 10 psi |

เมื่อพิจารณาผลตอบสนองของความดันก๊าซพบว่า ความดันก๊าซมีค่าปกติ ไม่เกิดการพุ่งเกินและมีการใช้งานความดันก๊าซอยู่ในช่วงที่กำหนดคือ 10 psi ตลอดการทำงานของระบบ

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

บทนี้กล่าวถึงบทสรุปและข้อเสนอแนะหลังจากที่ได้ทำการศึกษาวิธีการสร้างจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเทอร์โมอิเล็กทริก การควบคุมปริมาณก๊าซธรรมชาติโดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี และการจำลองการทำงานของแบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเทอร์โมอิเล็กทริก และการทำงานของตัวควบคุมพีไอดี โดยการปรับแต่งทั้งสองแบบ หลังจากนั้นก็ได้ทำการออกแบบให้อยู่ในรูปแบบระบบอัตโนมัติที่ทำงานบนโปรแกรม MATLAB Simulink เพื่อที่จะนำไปประยุกต์ใช้งานจริงเพื่อประมวลผลการทำงานเสมือนเครื่องจักร TEG

5.1 สรุป

วิทยานิพนธ์นี้ได้แสดงให้เห็นว่า การหาค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเทอร์โมอิเล็กทริก โดยใช้รูปแบบ Transfer function แบบ FOPDT เป็นแบบจำลองระบบ เราสามารถใช้รูปแบบนี้ สำหรับการออกแบบตัวควบคุมเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเทอร์โมอิเล็กทริก และการศึกษาครั้งนี้ก็ได้ยังได้ศึกษาการทำงานของเครื่องจักรเมื่อต้องใช้งานร่วมกับโหลดทางไฟฟ้า เพื่อผลตอบแทนของแรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุต ดังสามารถสรุปออกมาดังนี้

การออกแบบตัวจำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB Simulink เพื่อจำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเทอร์โมอิเล็กทริกได้ผลใกล้เคียงกับการทำงานของเครื่องจักรมากที่สุด โดยมีความผิดพลาดน้อยกว่า 5% อีกทั้งยังสามารถออกแบบระบบควบคุม PID ซึ่งสามารถควบคุมเวลาในการทำงานของเครื่องและปริมาณของก๊าซธรรมชาติได้อย่างเหมาะสม คือเวลาที่ใช้ในช่วง Start up จนถึงระดับแรงดันคงที่รวมแล้วลดลงกว่า 25% เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองที่ไม่มีตัวควบคุม

5.2 ปัญหา

5.2.1 ใช้เวลาหกเดือนในการเก็บข้อมูลเพื่อให้ได้ค่าของตัวอย่างมากพอที่จะทำให้ข้อมูลมีประสิทธิภาพในการนำมาวิเคราะห์เพื่อออกแบบ แบบจำลอง

5.2.2 ในการปรับระดับความดันก๊าซธรรมชาติของระบบควบคุมโดยทั่วไปจะใช้เป็นเปอร์เซ็นต์พื้นที่หน้าตัดของท่อ แต่ด้วยขนาดของท่อที่มีขนาดหน้าตัดเล็ก เราไม่สามารถหาตัวควบคุม ที่สามารถควบคุมระดับของท่อที่มีพื้นที่หน้าตัดขนาดเล็กได้ ดังนั้นเราจึงสามารถควบคุมความดันก๊าซโดยใช้ปริมาณก๊าซเท่านั้น ไม่สามารถควบคุมความดันก๊าซแบบปรับระดับได้

5.2.3 ด้วยขีดจำกัดของเครื่องจึงไม่สามารถทราบอุณหภูมิที่แท้จริงที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้ได้ ดังนั้นเราจึงไม่สามารถออกแบบระบบควบคุมอุณหภูมิของเครื่องได้

5.2.4 ในการสร้างแบบจำลองการทำงานต้องจำลองระบบมาจากข้อมูลจริง มิฉะนั้นข้อมูลที่ได้จะมีความคลาดเคลื่อน

5.2.5 การออกแบบตัวควบคุม PID สามารถใช้ได้จำเพาะ เฉพาะความดันก๊าซที่ไม่เกิน 10 psi เท่านั้น เพราะจะทำให้ส่วนสร้างพลังงาน (Power Unit) ของ TEG เกิดการเสียหายได้

5.2.6 การพุ่งเกิน (Overshoot) ของแรงดันไฟฟ้าสถานการณ์ที่เราเรียกว่า การเกิดอินทิกรัลไวด์อัป (Integral windup) ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงอย่างมากที่เกิดขึ้นกับค่า Setpoint โดยการอินทิเกรตค่าผิดพลาดสะสมในช่วงที่ PID เริ่มทำงาน ซึ่งผลของการเกิด windup จะทำให้เกิดค่าพุ่งเกินของแรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตและทำให้ระบบไม่สามารถเข้าสู่ค่า Setpoint ได้

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 ควรหาวิธีที่ช่วยลดเวลาในการเก็บข้อมูลเพื่อให้ได้ข้อมูลที่มาใช้ในการออกแบบได้มากขึ้นในเวลาที่เหมาะสม

5.3.2 หากมีการพัฒนาตัวที่มีประสิทธิภาพสูงสามารถควบคุมพื้นที่หน้าตัดของท่อที่มีขนาดเล็กได้ จะช่วยให้ข้อมูลที่ได้จากการทดลองสามารถตอบสนองค่าที่เกิดขึ้นได้อย่างแท้จริง

5.3.3 การทดลองนี้สามารถต่อยอดการออกแบบระบบควบคุมอุณหภูมิได้ซึ่งจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการควบคุมเครื่องได้ดียิ่งขึ้น

5.3.4 ควรมีการหาค่าเบี่ยงเบนประกอบการสร้างแบบจำลองการทำงานเพื่อสนับสนุนข้อดีของระบบจำลองเพื่อให้ได้ค่าที่มีความเที่ยงตรง

5.3.5 สามารถต่อยอดการพัฒนาการออกแบบตัวควบคุม PID แบบปรับตัวได้เพื่อใช้กับความดันก๊าซในสถานะต่างๆ

5.3.5 การแก้ไขปัญหาการพุ่งเกินของแรงดันไฟฟ้าในภาวะที่ถูกจำกัดความดันก๊าซสามารถทำการแก้ไขได้โดยการใช้หลักการ Anti-windup เพื่อ Reset ค่า Integral เพื่อให้ระบบมีค่าเอาต์พุตที่มีค่าไม่เกินกว่า Setpoint ที่กำหนด

บรรณานุกรม

- [1] A. Moser, L. Rendler, M. Kratschmer and P. Woias, "Transient model for thermoelectric generator system harvesting from the natural ambient temperature cycle," Department of microsystems engineering -IMTEK, pp. 1-4, 2004.
- [2] M. Chen, L. A. Rosendahl, I. Bach, T. Condra and J. K. Pedersen, "Multi-physics simulation of thermoelectric generator through numerically modeling," Thermoelectrics 2007 ICT 2007 26th International Conference, pp. 300-305, 2007.
- [3] H. L. Tsai, J. M. Lin, "Model Building and Simulation of Thermoelectric Module," Electronic Materials, vol. 39, no. 9, pp. 2105-2111, 2009.
- [4] M. Chen, L. A. Rosendahl, T. Condra and J. K. Pedersen, "Numerical Modeling of Thermoelectric Generators With Varing Material Properties in a Circuit Simulator," Energy Conversion IEEE Transactions, vol. 24, no. 1, pp. 112-124, 2009.
- [5] S. Kim, "Analysis and modeling of effective temperature," Applied Energy, vol. 102, pp. 1458-1463, 2013.
- [6] M. Chen, L. A. Rosendahl, T. Condra and J. K. Pedersen, "Transient Behavior study of Thermoelectric generators through an electro-thermal model using SPICE," International conference on Thermoelectrics 2006 IEEE, pp. 214-219, 2006.
- [7] Y-Y. Hsiao, W.C. Chang and S. L. Chen, "A Mathematic model of Thermoelectric module with applications on waste heat recovery from automobile engine," ELSEVIER Energy, vol. 35, pp. 1447-1454, 2010.
- [8] S. Lineykin and S. Ben-Yaakov, "Spice compatible equivalent circuit of the energy conversion process in thermoelectric modules," Electrical and Electronics Engineers in Israel, pp. 346-349, 2004.
- [9] J. P. Carmo, J. Antunes, M. F. Silva, J. F. Riibeiro, L. M. Goncalves and J. H. Correia, "Characterization of thermoelectric generators by measuring the load-dependence behavior," ELSEVIER Measurement, vol. 44, pp. 2149-2199, 2011.
- [10] M. Freunek, M. Muller, T. Ungan, W. Walker and L. M. Reindl, "New Physical Model for Thermoelectric generators," Journal of Electronics Materials, vol. 38, no. 7, pp. 1214-1220, 2009.

บรรณานุกรม (ต่อ)

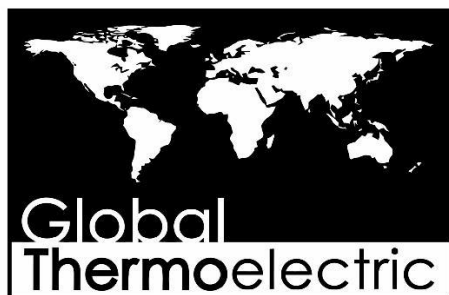
- [11] B. I. Ismail and W. H. Ahmed, "Thermoelectric power generation using waste-heat energy as an alternative green technology," *Recent Advances in Electrical & Electronic Engineering*, vol. 2, no. 1, pp. 27-39, 2008.
- [12] P. E. Gray, "The effect of source and sink thermal resistance on thermoelectric generator," *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Part I: Communication and Electronics*, vol. 79, pp. 15-19, 1960.
- [13] J. A. Chávez, "Spice model of thermoelectric elements including thermal effects," *Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2000. IMTC 2000. Proceedings of the 17th IEEE*, vol. 2, pp. 1019–1023, 2000.
- [14] M. Chen, L. A. Rosendahl, T. Condra and J. K. Pedersen, "Design Methodology of Large-Scale Thermoelectric Generation: A Hierarchical Modeling Approach," *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS)*, pp. 1-7, 2011.
- [15] S. Lineykin, S. Ben-Yaakov, "Modeling and analysis of Thermoelectric modules," *Industry Applications IEEE transactions*, vol. 43, no. 2, pp. 505-512, 2005.
- [16] T. M. Corry and G. Spira, "Thermoelectric generator design, performance and Application," *IRE Transactions on Military Electronics*, vol. MIL-6, pp. 34-40, 1962.
- [17] P. G. Lau, R. J. Buist, "Calculation of thermoelectric power generation performance using finite element analysis," *Thermoelectrics, 1997. Proceedings ICT '97. XVI International Conference*, Aug. 1997, pp. 563-566. 1997.
- [18] S. Lineykin and S. Ben-Yaakov, "Analysis of thermoelectric coolers by a SPICE-compatible equivalent circuit model," *IEEE Power Electronics Letters*, vol. 3, no. 2, pp. 63 - 66, 2005.
- [19] J. Chen and Z. Yan, "The influence of thomson effect on the maximum power output and maximum efficiency of thermoelectric generator," *Journal of Applied Physics*, vol.79, pp. 8823-8828, 1996.
- [20] I. Laird, D. C. Lu, "SPICE steady state modeling of thermoelectric generators involving the Thomson effect," *IECON 2011 - 37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 1584-1589, 2011.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [21] R. J. Buist and P. G. Lau, "Thermoelectric generator design and selection from TE Cooling module specifications," *Thermoelectrics*, 1997. Proceedings ICT '97. XVI International Conference, pp. 551-554, 1997.
- [22] ทศวรรษ สีตะวัน, "เทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทริก," สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, หน้า 1-6, 2015.
- [23] D. J. Cooper, "Practical Process Control," Control Station Inc Storrs CT (2004), pp. 55-102, 2004.
- [24] F. G. Shinskey, "Process Control Systems: Application, Design, and Tuning." Fourth edition, Mc Graw Hill, pp. 9-36, 1996.
- [25] K. J. Astrom, T. Hagglund, "PID controller theory, design, and tuning," *Instrument Society of America*, no. 2, 1995.
- [26] C. A. Smith, A. B. Corripio, *Principles and practice of automatic process control*, John Wiley and Sons, Inc., New York, vol. 2, 2013.
- [27] C. C. Hang, K. J. Astrom, W. K. Ho, "Refinements of the Ziegler-Nichols tuning formula," *Control Theory and Applications*, IEE Proceedings, vol. 138, no. 2, pp. 111-118, 1991.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
TEG operating manual



1120 Thermoelectric Generator

Operating Manual

Global Thermoelectric
#9, 3700 - 78 AVE., S.E.,
Calgary, Alberta, Canada
T2C 2L8

Phone: 1 (403) 236-5556
Fax: 1 (403) 236-5575

2 OPERATION

2.1 Data Plate

2.1.1 **Location:** Data Plate is located on the inside of the right-hand cabinet door.

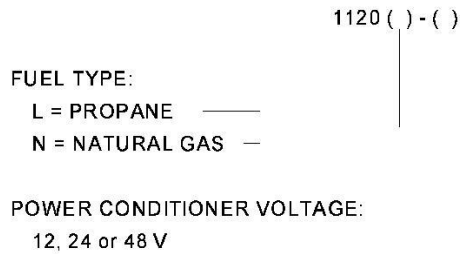
2.1.2 **Fuel Type:** An "X" is stamped in the appropriate box for Natural Gas or Propane.

IMPORTANT: Each type of fuel requires a particular orifice, therefore use only the fuel indicated on the data plate.

NOTE: If butane is used, the data plate will indicate propane. This is because the energy content of propane and butane are nearly equal; therefore, they require the same orifice.

2.1.3 **Model Number:** The model number on the Data Plate is interpreted as follows.

2.1.4 **Fuel Pressure, Power, Voltage:** The fuel pressure, power output and voltage across



the precision load that were measured during the factory performance test are recorded on the data plate. Observe that the fuel pressure is stamped in kPa and that the pressure gauge has scales for both kPa and psi. Figure 9 shows how the fuel gauge pressure differs from that stamped on the data plate if the TEG site is at an elevation different than Global's factory (750 meters). This is due to the fact that the gauge reading varies with atmospheric pressure which changes with site elevation. This information is provided for reference only because, as you will see, the fuel pressure is adjusted to obtain the desired power.

2.1.5 **Serial Number:** The serial number is a unique number assigned by Global to provide traceability.

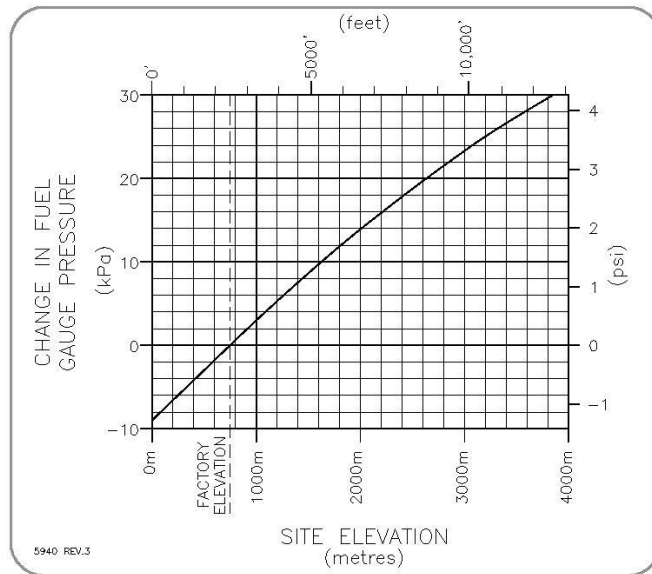


Figure 9 Change in Fuel Pressure Vs Elevation

2.2 Start-Up Data Sheets

Start-up Data Sheets are provided at the back of this section to assist you in setting up the TEG properly. During set up you will be asked to record data on these sheets so remove one at this time and keep it available. It is recommended that a Data Sheet be used each time the TEG is started. They are valuable for future reference. If additional sheets are needed they can be duplicated.

2.3 Starting Generator

Perform the following steps (see Figure 10):

- 2.3.1 Turn on fuel. Loosen the lock nut on the fuel regulator.
- 2.3.2 If required, correct the factory set fuel pressure for the elevation as per Figure 9, **Change in Fuel Pressure Vs. Elevation**.
- 2.3.3 Adjust the air shutters to slightly fuel rich from the factory set position. Note that the air shutters should always be adjusted equally in small increments.
- 2.3.4 Set the "Power Switch" to set up position.
- 2.3.5 Set the "Output Voltage Adjust" to middle position.

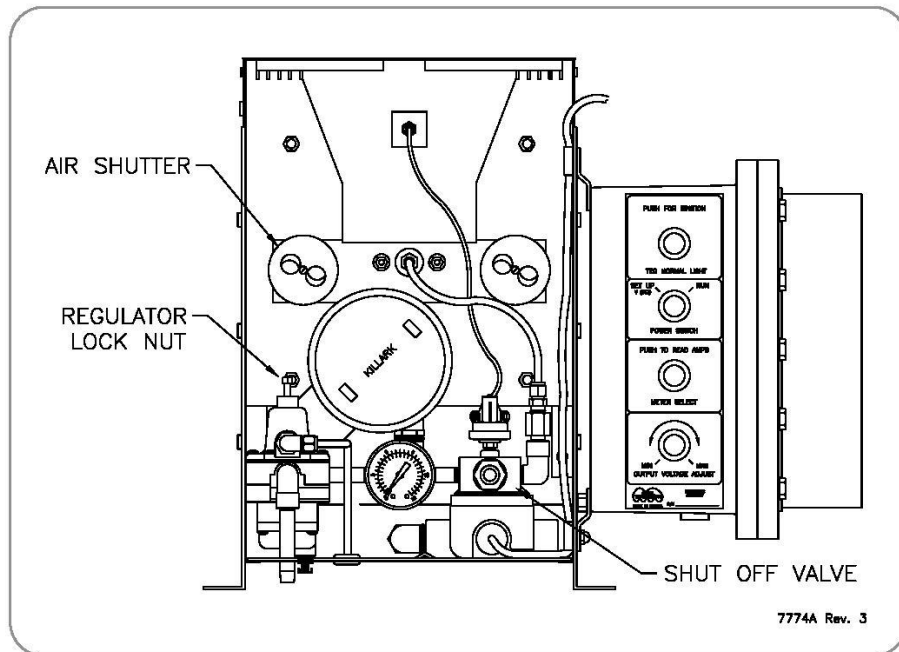


Figure 10 TEG Start Up

2.3.6 Press down the button on the shut off valve. The TEG should immediately start firing, as noted by a popping inside the combustion chamber. The TEG will pop until sustained ignition occurs (purring sound). Record the time of sustained ignition.

Note: If popping and sustained ignition cannot be obtained quickly, adjust the air shutters to air rich position until sustained ignition occurs, then using several small steps, return the air shutters to the factory set position.

2.4 Heat Up to Rated Power

TEG performance is determined by measuring the voltage across the precision load. This voltage is defined as V_{set} and is measured by the digital panel meter when the power switch is in the set up position.

2.5 V_{set} Versus Time

The heat up characteristic of the TEG is shown in Figure 11, which gives V_{set} as a function of time after ignition. This curve is for a TEG set at the fuel pressure that produces rated power. During this heat up period, measure the V_{set} and record it as item 2 on the start up data sheet at the time intervals specified. To monitor progress during heat up, compare your measurements with those shown in Figure 11.

After 20 minutes of operation observe the V_{set} and determine the following:

- 1) If V_{set} is near 6 volts, the fuel pressure is set for rated power.
- 2) If V_{set} is less than 5.5 volts, the fuel pressure is set for less than rated power, but do not adjust at this time.
- 3) If V_{set} is greater than 6.5 volts, the fuel pressure is set for more than rated power. Reduce the fuel pressure by 9.8 kPa (1.4 psi) at this time, see Figure 10 and Figure 13.

WARNING: To prevent damage to the TEG do not allow the V_{set} to exceed 7.1 volts at ambient temperatures above 24°C (75°F).

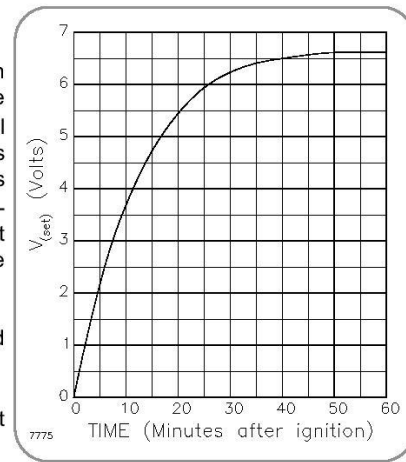


Figure 11 V_{set} Vs Time

2.6 V_{set} Versus Power

V_{set} the voltage across the precision load, is a measure of power. The value of the precision load (0.387 ohms) is selected to provide the optimum load condition for the TEG.

The relationship between V_{set} and power (P) is:

$$P = \frac{V_{set}^2}{0.387}$$

This relationship is shown in Figure 12. The graph gives V_{set} as a function of set-up power. In determining power (P) consider the following example:

- 1) Your V_{set} is 6.12 volts.
- 2) Locate 6.12 volts on the vertical axis.
- 3) Read horizontally until intersecting the curve.
- 4) Read vertically downward to the horizontal axis to determine power.

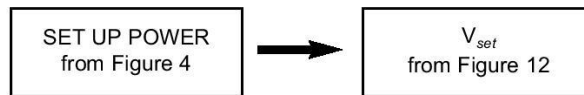
- 5) Which is 97 watts.

In determining V_{set} consider the following:

- 1) The power is 120 watts.
- 2) Locate 120 watts on the horizontal axis.
- 3) Read vertically until intersecting the curve.
- 4) Read horizontally to the vertical axis to determine V_{set} .
- 5) Which is 6.8 volts.

2.7 Determining Required V_{set}

This heat up period is the ideal time to determine the V_{set} . V_{set} is based on set up power as follows:



Set up power is found by adjusting the desired power for ambient temperature. V_{set} is determined from set up power as shown in Figure 12.

- 1) Estimate the maximum ambient temperature expected at the side and record on the start up data sheet as Item 3.
- 2) Measure or estimate the present ambient temperature and record as Item 4.

If rated power or maximum allowable power is desired:

- 3) Use the information in Figure 4 and the procedures in section 1.7 to determine the corresponding set up power and record as Item 5.
- 4) Use Figure 12 to determine the related V_{set} and record as Item 6.

If less than rated power is desired:

- 5) Determine the desired power output.
- 6) Determine the corresponding set up power by adding 0.3 watts to the desired power for each °C difference between the present and maximum ambient temperatures.
- 7) Refer to Figure 12 to determine the related V_{set} and record as Item 6.

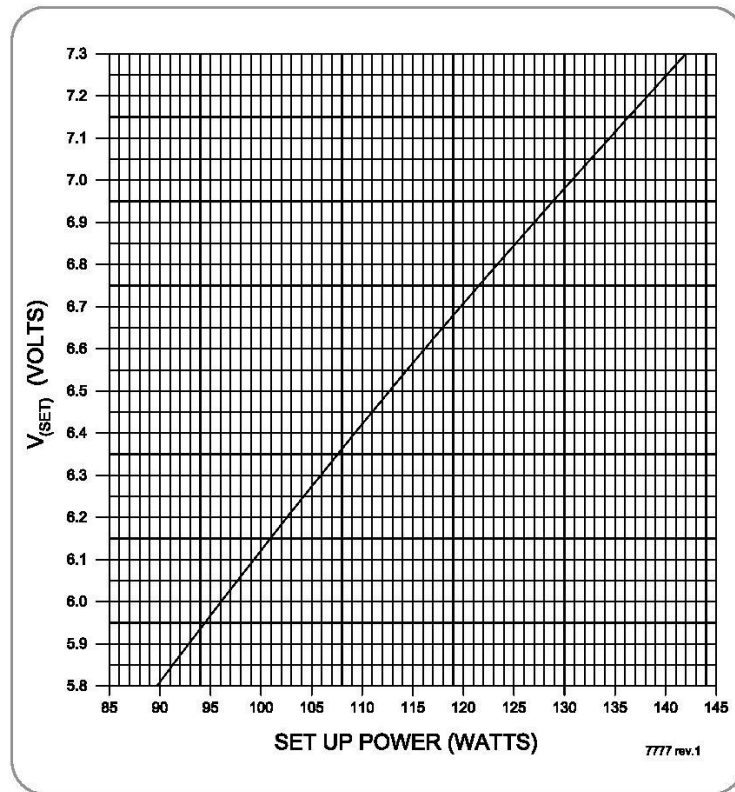


Figure 12 V_{set} Vs Set up Power

2.8 Fuel & Air Adjustment

After the TEG has been operating for one hour, V_{set} should not be changing with time. The readings on the start up data sheet at 40 and 60 minutes should not differ by more than 0.2 volts. When you are satisfied that V_{set} is not changing with time, compare the measured value of V_{set} with the required V_{set} , Item 6. Proceed with air shutter adjustments to optimize the burner first (section 2.9) then adjust the fuel pressure as required (section 2.10).

2.9 Air Shutter adjustment

This burner contains dual air shutters which control the amount of air used for combustion. See Figure 10.

If too little air is used (fuel rich), combustion is incomplete and not all the energy in the fuel is converted to heat.

If too much air is used (air rich), additional energy is required to heat the excess air to exhaust temperature.

In both cases fuel is being wasted. When the air shutter is at its optimum setting (neither of above) the TEG is operating at maximum efficiency.

NOTE: If available a combustion analyzer will facilitate rapid air shutter optimizing as you need not wait for V_{set} to change.

Figure 13 shows change in V_{set} as a function of air shutter settings. Observe that V_{set} decreases more rapidly on the fuel rich side than on the air rich side. For this reason a fuel rich operation is to be avoided.

Make initial adjustments of air shutters towards the fuel rich side by decreasing the air holes. Both air shutters are to be adjusted equally in small increments. Wait 5 to 10 minutes for burner to stabilize. Note the V_{set} and record.

If V_{set} increased or did not change, the burner is air rich. Continue decreasing the air holes until a slight decrease is observed.

Note: You must wait the required time after each adjustment. When a decrease in V_{set} has occurred, increase the air hole size by rotating the air shutter back about 2.5mm. This should ensure slightly air rich (optimum) settings.

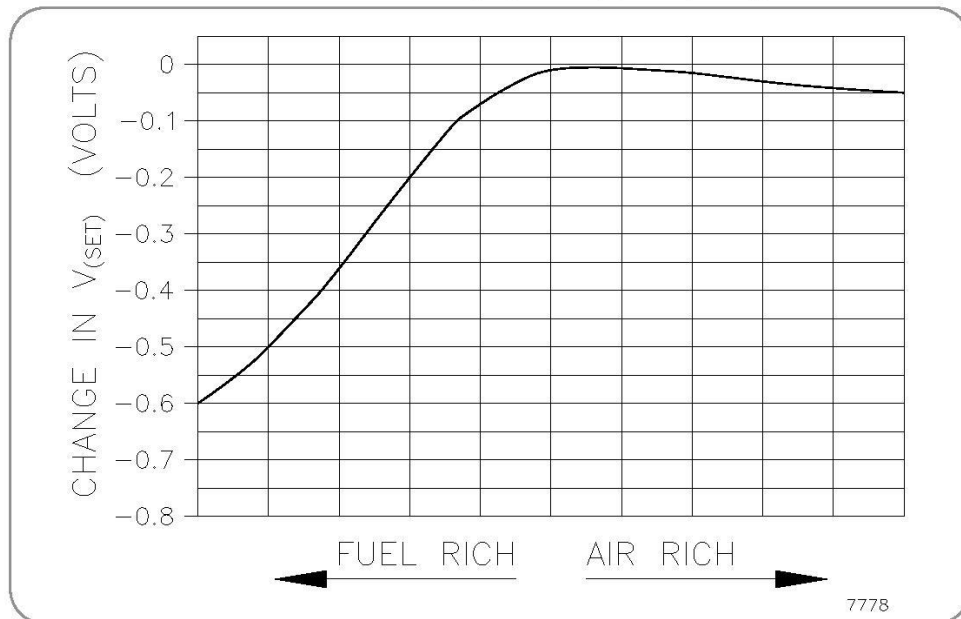


Figure 13 Change in V_{set} Vs Air Shutting Setting

If V_{set} decreased you are presently fuel rich. Enlarge the air holes until V_{set} peaks then increase the air holes slightly more towards the air rich side (optimum settings).

After the unit has stabilized, read V_{set} and compare with required V_{set} Item 6.

If these values are not within ± 0.1 volts, proceed to fuel pressure adjustment (paragraph 2.10).

If these values are within ± 0.1 volts, the TEG is ready to switch to operate mode.

2.10 Fuel Pressure Adjustment

To change V_{set} it is necessary to change the fuel pressure. Figure 14 shows the change in V_{set} as a function of the change in fuel pressure for a typical TEG operating at rated power. The following examples will illustrate how this curve can be used.

- 1) Suppose the measured V_{set} is 6.5 volts, but 6.7 volts or a change of +0.2 volts is required.
- 2) Locate the ± 0.2 volts on the vertical axis and read horizontally until intersecting the curve.
- 3) Read vertically down to the horizontal axis and find the required change in fuel pressure.
- 4) Which is 5.5 kPa (0.8 psi).

You must increase the fuel pressure by 5.5 kPa or 0.8 psi.

- 5) Suppose the measured V_{set} is 6.8 volts and that 6.5 volts or a change of -0.3 volts is required.
- 6) Locate -0.3 on the vertical axis and read horizontally until intersecting the curve.
- 7) Read vertically down to the horizontal axis and find the required change in fuel pressure.
- 8) Which is -8.3 kPa (-1.2 psi).

You must decrease the fuel pressure by 8.3 kPa or 1.2 psi.

2.10.1 Use the following procedures to make the adjustment in fuel pressure:

- 1) Record V_{set} after a minimum of one hour of operation as Item 7.

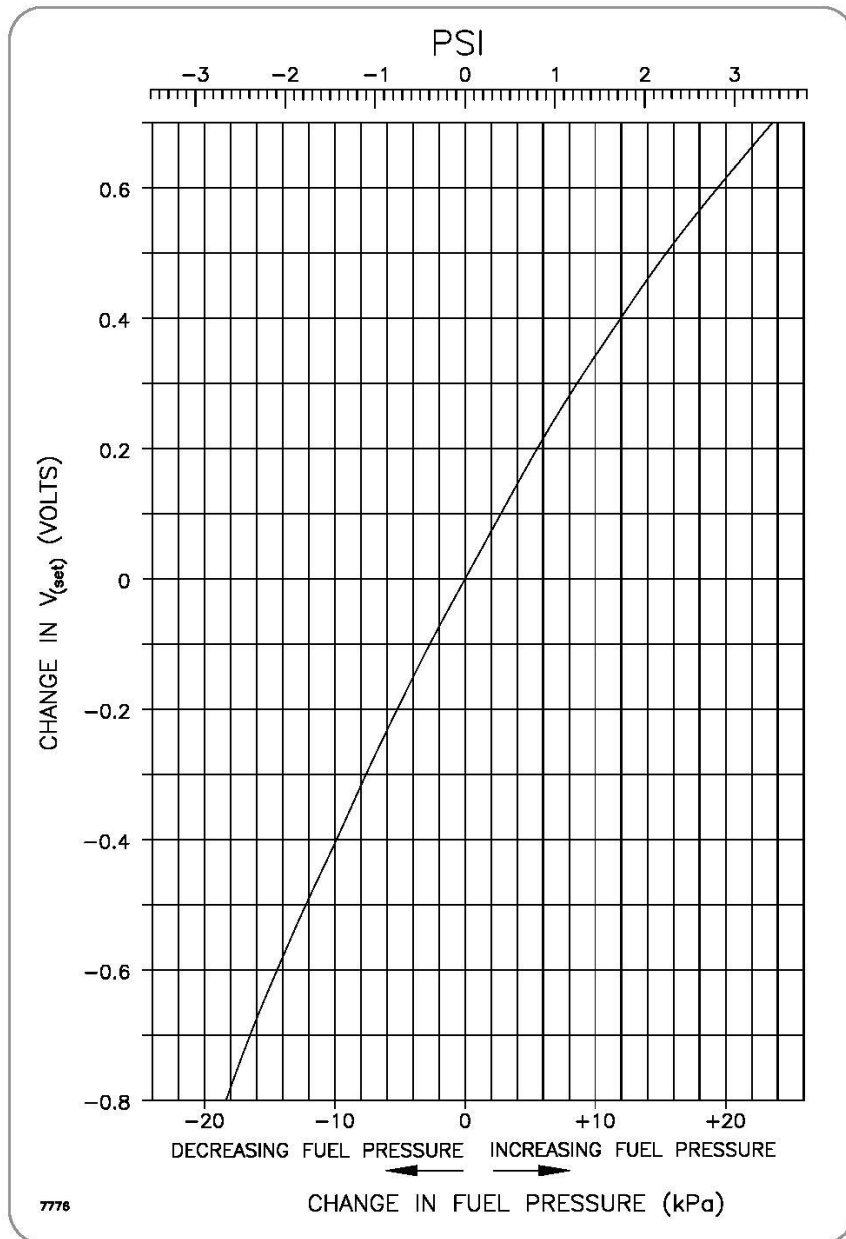


Figure 14 Fuel Pressure Vs V_{set}

- 2) Determine the required change in V_{set} by subtracting Item 7 from Item 6 and record as Item 8.
- 3) Record the fuel pressure as Item 9.
- 4) Determine the required change in fuel pressure from Figure 14 and record as Item 10.
- 5) Determine the new fuel pressure by adding Item 10 to Item 9 and record as Item 11.

EXAMPLE:

Item 9 = 37.9 kPa (5.5 psi)

Item 10 = 2.1 kPa (0.3 psi)

New Fuel

Pressure = 35.8 kPa (5.2 psi)

- 6) Adjust the fuel pressure to the value in Item 11. Close the cabinet doors and record the time.
- 7) Wait at least 10 minutes and record V_{set} as Item 12.
- 8) Compare this new value of V_{set} in Item 12 to the required value in Item 6. If the two are still different by an unacceptable amount, repeat this procedure using the latest values of V_{set} and fuel pressures as Items 7 and 9.
- 9) When the measured and required values of V_{set} are in agreement, the TEG is ready to switch to operation mode.

2.11 Applying Customer Load

The TEG is now operating at the required power output. If this is a single TEG system, it is ready to connect to the customer load. If there are multiple TEGs ensure that all units are ready before proceeding.

- 1) If station batteries are present, measure and record their voltage. Batteries should be fully charged; if they are discharged below 22 volts, the 1120 TEG will not charge the station battery.
- 2) Set power switch to "Run" position, see Figure 10. The TEG "normal" light should come on. Adjust the voltage control to the desired operating voltage plus 0.7 volts using the Output Voltage Adjust dial on the electronics box and the reading on digital panel meter. If a multiple TEG system is in use, ensure that all outputs are equal.

Note: The TEG incorporates a protective series diode. The output voltage will drop 0.7 volts from the no load to loaded condition.

Push the red "Meter Select" button to read the current.

- 3) Connect the customer load via disconnects mentioned in Electrical Connection section 1.12. The TEG "Normal" light should remain as a steady glow, if the lamp dims or the output voltage drops significantly, the TEG is being overloaded. Ensure that the load is no more than 100 watts at 24-30 volts.
- 4) In multiple generator systems ensure that all outputs are set the same.

ภาคผนวก ข
การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

System Modelling and Controller designed for Thermoelectric Generator using a First Order Plus Dead Time

Rung-aroon Photoon¹ and Warit Wichakool², Non-members

ABSTRACT

This paper discusses the design, implementations and verification of Thermoelectric generator (TEG) modules using a first order plus dead time (FOPDT) in a Matlab/Simulink™ program. The models proposed in this paper were designed to improve the thermoelectric generator performance under the condition of the inlet fuel control system with performed load connections. The tuning for the proportional-integral-derivative (PID) controller was done with Dahlin synthesis tuning and Quarter decay ration tuning formulas. The comparisons result of simulations model from real TEG machine were examined and analysed against controller from simulation model to study the TEG system.

Keywords: Thermoelectric Generator, FOPDT.

1. INTRODUCTION

A basic thermoelectric generator machine is shown in Fig. 1.

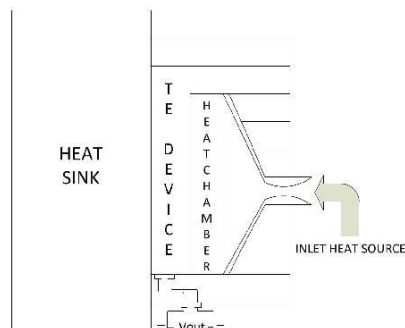


Fig. 1: Basic thermoelectric machine.

A thermoelectric generators (TEG) comprises basically of three main sections: a heat source, a heat

sink and a thermoelectric (TE) device. The heat source supply thermal energy while the heat sink is important in creating a temperature gradient across the TE device. The TE device basically works by converting the thermal energy in the thermal reservoir into an electrical energy. In terms of design, simplicity is one of the upside of TEG over other heat engines. In additional, an absence of moving parts makes TEG favorable for miniaturization.

The mathematical models of TEG are available which can be used to simulate their corresponding behaviors and performance analysis. Modeling and simulation enable us to analyze, design, and optimize the TEG by omitting the design cycle, which is easier. Recently, SPICE software is used to design an equivalent circuit model of TEG for easy model analysis and for further extraction of model parameter from specifications in commercial. Most authors studied transient behavior using SPICE software in order to analyze the voltage output under different thermal reservoirs and electrical load conditions. However, the results were not able to predict the exact time to reach a steady state condition [1]-[10]. The circuit models designed using SPICE is more suitable for simulation of power electronics applications.

For the simulation of control objective, it is a better option to build a TEG model using a Matlab/Simulink package. Aati Kane studied performance of thermoelectric module (TEM) using Matlab/Simulink [11]. The Seebeck, Peltier and Thomson coefficients were experimentally with respect to temperature dependent to extract voltage and current output when TEM working in dynamic mode. Huan-Liang Tsi studied and performed TEM model using Matlab/Simulink and extract voltage and current at standard temperature and compare to commercial TEC1-12710 module [12]. However, both cases used SPICE model to analyze the voltage output behavior under different thermal reservoirs.

The system model is simplified by utilizing a first order plus dead time (FOPDT) to model the TEG module [13]-[14]. A complicated higher-ordered system model with a simple dead time delay and a lower-ordered system can be represented using the FOPDT model. Even though we are able to determine the dead time delay and the system time constant through a graphical method [15]-[16], its accuracy rely on the drawing of the line tangent to the

Manuscript received on August 14, 2015.

Final manuscript received on February 12, 2016.

^{1,2}The authors are with Department of Electrical Engineering Faculty of Engineering, Prince of Songkla University Hat Yai, Songkhla 90112, Thailand., E-mail:rung1515@gmail.com and warit.wi@psu.ac.th

process reaction curve at the point of maximum rate of change. Thus, to reduce the model error, the fitting curve was designed following the qualifying dynamic process behavior, which was proposed by Douglas J. Cooper [17]. By examining the FOPDT model and process step running of commercial TEG machine, this model is selected due to the fact that the method of step running of commercial TEG is identical to process step testing procedure of FOPDT model. A typical plot of voltage output over time of commercial TEG machine to the response curve of FOPDT model seems to be indistinguishable because both have dead time presented. A dead time is essential in the system step operating of commercial TEG machine in avoiding damage on TE device due to the high pressure at the first step input. Similarly, the process reaction from FOPDT model describes the dead time as the amount of delay for the first begin of model responses behavior. As a result, a simple PID controller can be designed using Zeigler-Nichols and Dahlin synthesis tuning process to analyze the performance of commercial TEG in simulation [18].

This paper illustrates the steps in modeling a simple TEG system using the FOPDT model in Matlab/Simulink. In addition, the paper discusses the method for using the determined model to design a simple controller to enhance the TEG system performance. This paper is organized as follows. First, we describe the theory of the FOPDT and the extraction of its parameters. Next, the experimental setup is depicted. The real TEG system response is shown and verified. Finally, the results of simulated close-loop control obtained from the TEG system are shown and discussed.

2. THEORY AND SYSTEM MODEL

A simple block diagram of a TEG system is shown in Fig. 2

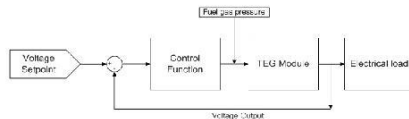


Fig. 2: Block diagram of a TEG system model.

The system model comprises of three parts, a control function, a TEG module and an electrical load. First, our concentration starts on modelling the TEG process module. The model used to predict a transfer function of the TEG is the FOPDT model. The reason we use FOPDT model is that this model can work on both dynamic test on the actual system or computer simulation of the process. It is simple to perform a step test which matches the process step running of a real commercial TEG machine. The three

difference parameters in low order transfer function are needed for identifications. Furthermore, the basic and main design methods and tuning techniques in the practical controllers such as PID controller are generalized and developed for the FOPDT transfer function. The proper experimental data consist of dynamic information that characterize our controller output to determine a process variable (PV) behaviour. A FOPDT model is a proper method to quantify by assigning numerical values to key aspects of this controller output (CO) to the process variable relationship which is used in controller. The FOPDT curve is shown in Fig. 3. The combination of a FOPDT process can be expressed in a differential equation as [18]

$$\tau_p \frac{dPV(t)}{dt} + PV(t) = K.CO(t - \theta_p). \quad (1)$$

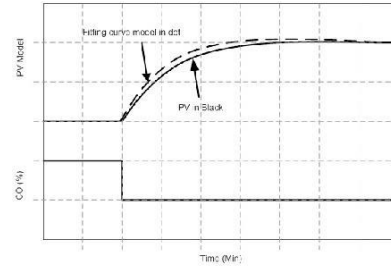


Fig. 3: FOPDT curve.

When CO changes, the parameter K represents the direction and how far the process variable moves. A time constant τ_p describes the time taken for the process variable to respond. A variable t is an active time and variable θ_p describes the amount of delay that occurs before the process variable starts to change.

The equation of transfer function of FOPDT can be represented as

$$G(s) = \left(\frac{K e^{-t_0 s}}{\tau s + 1} \right). \quad (2)$$

The model has three characteristic parameters to be determined. The variable K is a process gain, representing the direction and how far of process variable moves. It can be determined by the steady state level of the process output. The variable τ is a time constant, describing the time required for the process variable response. Finally the variable t_0 is a dead time, which describes how much delay occurs before the process variable first begins to change.

The TEG transfer function $G(s)$ can be approximated by a first-order model for the purpose of characterizing the dynamic response of the process. The

characterized process includes the dynamic behavior of the output signal that can be modelled by a stable FOPDT model. In order to identify the system parameters, we used a step response of the open loop TEG module, as shown in Fig. 4.



Fig.4: Block diagram for open loop test.

The step test procedure was carried out as follows. First, the input step change $m(t)$ was applied to the process and the process output response $c(t)$ was measured. The resulting plot of $c(t)$ versus time must cover entire test period of the step test until the system reaches a new steady state. A typical step response plot also known as a process reaction curve is shown in Fig. 5.

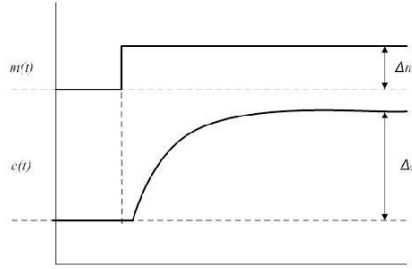


Fig.5: Process reaction curve to a step response.

From the block diagram for open loop test shown in Fig. 4, the process output of the FOPDT model in (1) is given by

$$C(s) = \left(\frac{K e^{-t_0 s}}{\tau s + 1} \right) \left(\frac{1}{s} \right). \quad (3)$$

Expanding this expression by partial fractions, we obtain

$$C(s) = K e^{-t_0 s} \left[\frac{1}{s} - \frac{\tau}{\tau s + 1} \right]. \quad (4)$$

We can obtain the time domain response of the system using the inverse Laplace transform. The process output is given by

$$c(t) = K u(t - t_0) [1 - e^{-(t-t_0)/\tau}]. \quad (5)$$

Where the unit step function is included to indicate explicitly that

$$c(t) = 0, \text{ for } t \leq t_0. \quad (6)$$

The perturbation of the transmitter output from its initial value is given by

$$\Delta c = c(t) - c(t = 0). \quad (7)$$

The steady state value of the process reaction curve can be calculated by

$$\lim_{t \rightarrow \infty} c(t) = K. \quad (8)$$

From Fig. 4, because the model response must match the process reaction curve at steady state, we can calculate the steady gain of the process, where is the step change in input response as

$$K = \frac{\Delta c}{\Delta m}. \quad (9)$$

After the process reaction is obtained, the control system can be designed by using a closed loop Quarter decay ratio compare to a Dahlin synthesis method.

The Quarter decay ratio method is a trial and error tuning method based on sustained oscillations which was first proposed by Ziegler-Nichols (1942). On the other hand, the Dahlin synthesis was originally introduced by Dahlin (1968), who defined the tuning parameter as the reciprocal of the close loop time constant. The connection between process transfer function and the modes of a PID controller can be established from the controller synthesis. These methods can propose a set of formulas based on the parameters of first order model fit to the process reaction curve.

Regarding to FOPDT equation, the results in the following synthesized controller transfer function as

$$G_c(s) = \left(\frac{\tau s + 1}{K e^{-t_0 s}} \right) \left(\frac{e^{-t_0 s}}{\tau_c s + 1 - e^{-t_0 s}} \right). \quad (10)$$

In order to convert the algorithm of Eq. 10 to the standard PID form we obtain the following synthesized controller transfer function as

$$G_c(s) = \left(\frac{\tau}{K(\tau_c + t_0)} \right) \left(1 + \frac{1}{\tau s} \right) \left(\frac{1 + \frac{\tau_0}{2}s}{1 + \tau s} \right). \quad (11)$$

The Quarter Decay ratio PID controllers is recommended for slow processes or the processes with dead time. The standard PID form we obtain the following Quarter Decay ratio controller transfer function as

$$G_c(s) = K \left(1 + \frac{1}{\tau s} \right) \left(\frac{\tau_d s}{\alpha \tau_d s + 1} \right). \quad (12)$$

Equation (12) shows that derivative portion is multiplied by the term $1/(\alpha \tau_d s + 1)$. This term, which can be recognized as the transfer function of a first

order system with gain of unity and a time constant equal to $\alpha\tau_d$, is referred as a filter. The filter does not usually effect the performance of the controller because the time constant is small and the variable τ_d is a derivative time.

The equivalent to an actual PID controller with tuning parameter of Quarter decay ratio and Dahlin synthesis shown in Table 1. The variable K represents the process gain, K_c represents the proportional gain, T_i represents the integral time, T_d represents the derivative time, t_0 represents the dead time, and τ_c represents the closed loop time constant while τ represents the time constant.

Table 1: Quarter decay and Dahlin synthesis formulas.

| PROCESS | PID Quarter decay ratio | PID Dahlin Synthesis |
|--|--|--------------------------------------|
| FOPDT $G(s) = \left(\frac{Ke^{-t_0s}}{\tau s + 1} \right)$ | $K_c = \frac{1.2}{K} \left(\frac{t_0}{\tau} \right)^{-1}$ | $K_c = \frac{\tau}{K(t_0 + \tau_c)}$ |
| | $T_i = 2t_0$ | $T_i = \tau$ |
| | $T_d = 0.5t_0$ | $T_d = 0.5\tau$ |

3. EXPERIMENTAL SETUP

The test rig was setup by using a commercially available TEG1120 as shown in Fig. 6.

In this research, we measured and recorded the values of the output voltage over times which were used to plot the response of process reaction curve. The experiments were done over the period of six months to verify that data were accurate enough in determining the parameter of the FOPDT function. At the inlet, the fuel gas that we applied to the pressure regulator was about 40% of maximum rating of the TEG. The maximum pressure rating for the TEG machine used should be at 4 psi, which means that the pressure applied was 1.6 psi. We then increased the pressure using a step input change with the steady state voltage set at 50% of the maximum rating value, which is 2 psi. By controlling the fuel gas pressure at this range, we can determine the minimum gas pressure required to get a good stable TEG voltage under shorter amount of time.

The voltage outputs versus times were taken into account to plot for process reaction curve or open loop step response shown in Fig. 7. We used the incremental step response as an input for parameter extraction process.

Using a curve fitting method mentioned before, we obtained the parameters of FOPDT in (1) as follows, $K = 2.425$, $t_0 = 1.5$ minutes and $\tau = 7.5$ minutes.

Using a Simulink model as shown in Fig. 8, we verified the extracted parameters obtained. A determination of process transfer was done by comparing the incremental step response of the experimental result and the simulation result was shown in Fig. 9.



Fig.6: Experimental setup.

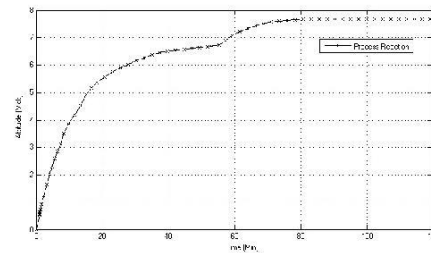


Fig.7: Process reaction curve from commercial TEG machine.

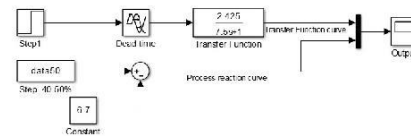


Fig.8: Simulation block diagram for verifying the obtained FOPDT model for the TEG system.

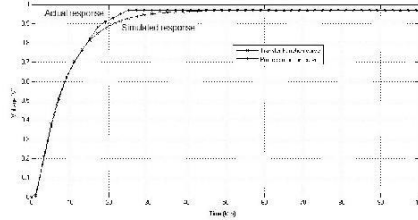


Fig.9: Comparison between the actual response and the simulated response using a FOPDT model.

The incremental step response from the experiment and the Simulink model were closely fitted together as shown in Fig. 9. The deviation between transfer function curve and process reaction curve is caused from calculation of proper time constant with maintain the same value between simulated and actual response. Alternatively, the actual response shows a small overshoot, which indicates a damped second-ordered system. However, the deviation is not too big. As a result, the FOPDT can be used to model a complicated system such as the TEG for further study purposes.

The controller tuning was done under no load connection to get the actual result. Practically, different machines will have different amount of load, which can result in different voltage drops. As the load varies, it is better to exclude the load from the tuning process to obtain more accurate result.

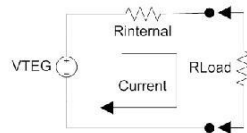


Fig.10: An equivalent circuit of TEG.

Fig. 10 shows the equivalent circuit for the TEG. This based from the voltage divider theory, the internal load can be estimated. By measuring the corresponding voltage and current across each of the load used, we can estimate the voltage drop across the internal resistance. Next, this voltage drop and the measured current values can be used to calculate the internal load resistance value. The calculated internal load values for each of the corresponding load used and the average internal load are shown in Table 2 below.

We used the derived transfer function model to design a simple controller to study its behaviour under a closed-loop control system. Tuning formulas of

Table 2: Internal resistance estimation.

| Rload | Voltage (Measured) | Current (Measured) | Internal Load (Calculated) | Average Internal Load (Calculated) |
|-------------|--------------------|--------------------|----------------------------|------------------------------------|
| 1 Ω | 5.30 V | 5.30 A | 0.28 Ohm | 0.31 Ohm |
| 2 Ω | 6.00 V | 3.00 A | 0.27 Ohm | |
| 5 Ω | 6.50 V | 1.30 A | 0.23 Ohm | |
| 10 Ω | 6.50 V | 0.65 A | 0.46 Ohm | |

Quarter decay ratio and Dahlin synthesis are given in Table 3.

Table 3: Quarter decay ratio and Dahlin synthesis parameters.

| PROCESS | PID Quarter decay ratio | PID Dahlin synthesis |
|---|-------------------------|----------------------|
| FOPDT | $K_c = 2.474$ | $K_c = 1.134$ |
| $G(s) = \left(\frac{2.425e^{-1.5s}}{7.5s + 1} \right)$ | $T_i = 3.000$ | $T_i = 7.500$ |
| | $T_d = 0.750$ | $T_d = 3.750$ |

The comparison results of voltage output which operate on different electrical load values were used in the model and their respective results were compared with voltage output from physical machine.

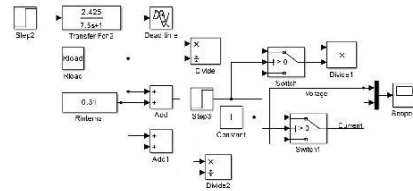


Fig.11: Completed simulation model with electric load connection.

The electric loads of 1 Ohm, 2 Ohm, 5 Ohm, and 10 Ohm together with internal load were selected to be used in the model. The switch for each of the electrical load will be activated when the completed model achieve its steady state time.

Fig. 12 above represents the output voltage of the system model with electrical load connected when the system is operating at the steady state. The voltage output current and internal resistance is based on the voltage divider theory. Fig. 13 shows the output voltage and current obtained from the physical machine. The electrical load used is connected when the voltage reach 6.8 volt.

Table 4 above shows the different output voltage and current with respect to the load of the system model used. By comparing the voltage and current values obtained from simulation and physical machine, we can conclude that both sets of result are almost the same. One of the hiding conditions is the internal

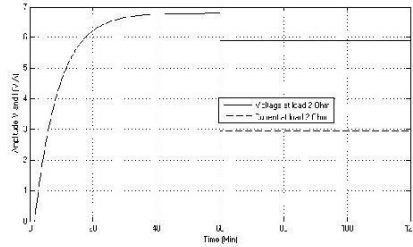


Fig.12: The system step response using completed simulation model with electric load connection.

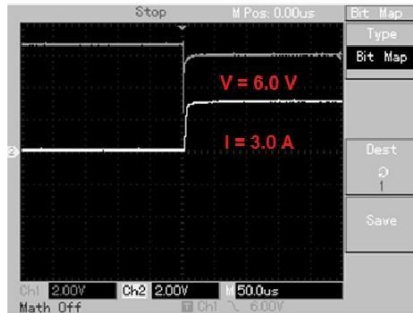


Fig.13: The output response from physical machine.

Table 4: Comparison of step response system model and physical machine.

| Rload | Voltage (Measured) | Voltage (Simulated) | Current (Measured) | Current (Simulated) |
|-------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|
| 1 Ω | 5.30 V | 5.19 V | 5.30 A | 5.19 A |
| 2 Ω | 6.00 V | 5.89 V | 3.00 A | 2.94 A |
| 5 Ω | 6.50 V | 6.40 V | 1.30 A | 1.28 A |
| 10 Ω | 6.50 V | 6.60 V | 0.65 A | 0.66 A |

load that might have effect on the output voltage and current when electric load is connected.

Next, we tried to equip the system with the Dahlin synthesis PID controller together with electric load connection. This step is to validate that the PID controller can control output response back to the steady state voltage even the output voltage drop due to the electric load. The complete simulation model with PID controller was designed and PID parameters given to the PID block to simulate step response of both voltage and current.

4. RESULTS AND DISCUSSION

We simulated the completed closed-loop control of the TEG system without an electrical load using the controller parameter described in Table II. The unit

step response of the controlled system is shown in Fig. 14. And the completed of experimental data collection from real TEG machine was compared with data response from the Dahlin synthesis tuning.

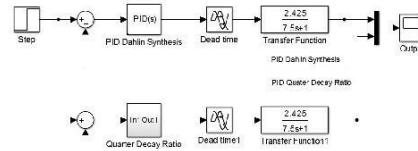


Fig.14: Completed simulation model for PID controller.

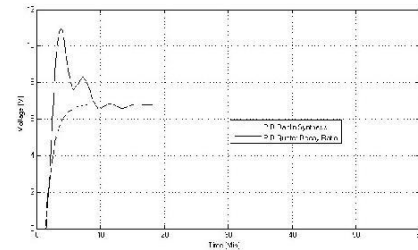


Fig.15: The system step response using the proposed method for PID controller.

The simulation results confirm that the proposed method can be applied to the simulation of thermoelectric generator control. Fig. 15 shows that the Quarter decay ratio tuning parameters results in a significant high overshoot, more oscillatory behaviour, and a longer settling time. More details on the step responses are shown in Table 5.

Table 5: Comparison of step response system model and physical machine.

| STEP RESPONSE | Quarter decay | Dahlin synthesis |
|---------------|---------------|------------------|
| Rise time | 2 minutes | 8 minutes |
| Peak time | 5 minutes | - |
| Settling time | 15 minutes | 10 minutes |

Fig. 16 shows that the system response for both voltage and current at the electric load when using PID controller.

5. CONCLUSION

This paper has shown that the parameter extraction of the TEG model using the FOPDT as a system model. We can utilize this model for designing a controller in order to enhance the system performance of the TEG system. Finally, it is possible to take

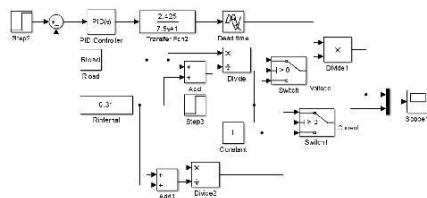


Fig.16: Completed simulation model for PID controller with electric load connection.

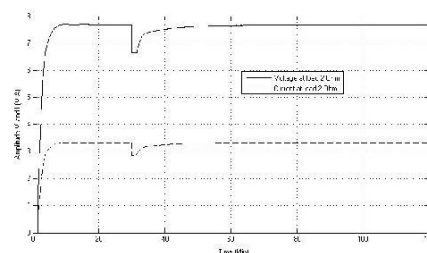


Fig.17: The system step response using completed simulation load connection.

into account an electrical load in the simulation for dynamic response study.

References

- [1] M. Chen, L.A. Rosendahl, I. Bach, T. Condra, J. K. Pedersen, "Design Methodology of Large-Scale Thermoelectric Generation: A Hierarchical Modeling Approach," *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS)*, pp. 1-7, 2011.
- [2] Simon Lineykin, Sam Ben-Yaakov, "Modeling and analysis of Thermoelectric modules," *Industry Applications IEEE transactions*, Vol. 43, No. 2, pp. 505-512, 2005.
- [3] Pual G. Lau, Richard J. Buist, "Calculation of thermoelectric power generation performance using finite element analysis," *Thermoelectrics, 1997. Proceedings ICT '97. XVI International Conference*, Aug. 1997, pp. 563-566.
- [4] Chen M, Rosendahl L, Condra T, Pedersen J, "Numerical Modeling of Thermoelectric Generators With Varing Material Properties in a Circuit Simulator," *Energy Conversion IEEE Transactions*, Vol. 24, No. 1, pp. 112-124, 2009.
- [5] Ian laird, Dylan D.C. Lu, "SPICE steady state modeling of thermoelectric generators involving the Thomson effect," *IECON 2011 - 37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 1584-1589, 2011.
- [6] Chen M, Rosendahl L, Condra T, Pedersen J, "Transient Behavior study of Thermoelectric generators through an electro-thermal model using SPICE," *International conference on Thermoelectrics 2006 IEEE*, pp. 214-219, 2006.
- [7] Y-Y. Hsiao, W.C. Chang and S.L. Chen, "A Mathematic model of Thermoelectric module with applications on waste heat recovery from automobile engine," *ELSEVIER Energy*, Vol.35, pp.1447-1454, 2010.
- [8] Huan-liang Tsai, Jium-Ming Lin, "Model Building and Simulation of Thermoelectric Module," *Electronic Materials*, Vol. 39, No. 9, pp. 2105-2111, 2009.
- [9] A. Moser, L. Rendler, M. Kratschmer and P. Woias, "Transient model for thermoelectric generator system harvesting from the natural ambient temperature cycle," *Department of microsystems engineering -IMTEK*, pp. 1-4, 2004.
- [10] S. Kim, "Analysis and modeling of effective temperature," *Applied Energy*, Vol. 102, pp. 1458-1463, 2013.
- [11] Aati Kane, Vishal Verma, Bhim Singh, "Temperature Dependent Analysis of Thermoelectric Module using Matlab/SIMULINK," *2012 IEEE International Conference on Power and Energy (PECon)*, pp. 623-637, 2012.
- [12] R.J. Buist and P. G. Lau, "Thermoelectric generator design and selection from TE Cooling module specifications," *Thermoelectrics, 1997. Proceedings ICT '97. XVI International Conference*, Aug. 1997 pp. 551-554.
- [13] J.P.Carmo, Joaquim Antunes, M.F. Silva, J.F. Ribeiro, L.M. Goncalves and J.H. Correia, "Characterization of thermoelectric generators by measuring the load-dependence behavior," *ELSEVIER Measurement*, Vol. 44, pp. 2149-2199, 2011.
- [14] Saeed Tavakoli, Peter Fleming, "Optimal tuning of PI controllers for first order plus dead time/long dead time models using dimensional analysis," *European Control Conference*, pp. 2196-2200, 2003.
- [15] Astrom K.J., Hagglund T, "PID controller theory, design, and tuning," *Instrument Society of America*, No. 2, 1995.
- [16] C.C. Hang, K.J. Astrom, W.K. Ho, "Refinements of the Ziegler-Nichols tuning formula," *Control Theory and Applications, IEE Proceedings*, Aug. 1991, Vol. 138, No. 2, pp. 111-118.
- [17] Douglas J. Cooper, *Practical Process Control*, Control Station, Inc, Storrs, CT (2004), 2004.
- [18] Carl, A. Smith, Armando B. Corripio, *Principles and practice of automatic process control*, John Wiley and Sons, Inc., New York Vol. 2, 2013.



Rung-aroon Photoon received his Bachelor degree in Electrical Engineering from Mahanakorn University, Thailand in 2007. Currently, he is a Electrical Trainer at Chevron Thailand Exploration and Production. His research interests include system modeling, control theory and electronics application.



Warit Wichakool received the S.B. and M.Eng. degrees in Electrical Engineering and Computer Science from the Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA in 2001, and his Ph.D. degree in Electrical Engineering at Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA in 2011. Currently he is a lecturer at Electrical Engineering Department, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Songkhla, Thailand. His research interests include system modeling, control theory and power electronics applications.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นาย รุ่งอรุณ โพธิ์คุ่น

รหัสนักศึกษา 5610120070

วุฒิการศึกษา

| วุฒิ | สถาบัน | ปีที่สำเร็จการศึกษา |
|--|----------------------------|---------------------|
| วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร | 2550 |

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการศึกษา)

ทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์

ตำแหน่งและสถานที่ทำงาน

ตำแหน่ง Trainer ศูนย์เศรษฐกิจพัฒนา

บริษัท เซฟรอนประเทศไทยสำรวจและผลิต จำกัด

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

Rung-aroon Photoon and Warit Wichakool, "System Modelling and Controller designed for Thermoelectric Generator using a First Order Plus Dead Time," *ECTI Transactions on Computer and Information Technology (ECTI-CIT)*, Vol. 10, No. 1, May 2016, pp 80-87.